

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Jana KUCHAROVÁ

**KLASIFIKACE SILNIČNÍ SÍTĚ Z DAT LETECKÉHO
LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ A OPTICKÝCH DAT DPZ
VYSOKÉHO ROZLIŠENÍ**

**CLASSIFICATION OF ROAD NETWORK FROM AIRBORNE
LASER SCANNING DATA AND FROM REMOTE SENSING IMAGES
WITH HIGH RESOLUTION**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Praha 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citovala.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 22. srpna 2013

.....

Jana Kuchařová

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za věnovaný čas, trpělivost, cenné rady a připomínky. Velké poděkování patří také mé rodině za podporu během celého studia.

Klasifikace silniční sítě z dat leteckého laserového skenování a optických dat DPZ vysokého rozlišení

Abstrakt

Objektová klasifikace krajinného pokryvu je v současné době jedním ze způsobů zpracování dat dálkového průzkumu Země. Klasifikace pouze silniční sítě je specifická, protože je pokryta antropogenním materiálem a má jiné vlastnosti než ostatní prvky krajiny. Tato práce se zabývá možností využití kombinace dat z leteckého laserového skenování a optických dat vysokého rozlišení pro detekci silniční sítě v dané lokalitě. Předpokladem je, že použití dvou různých typů dat by mohlo poskytnout kvalitnější výsledky, jelikož data z leteckého laserového skenování přináší velmi přesnou informaci o poloze a výšce bodu, zatímco družicová data velmi vysokého rozlišení reprezentují skutečnou krajinu. Hledání vhodných příznaků a klasifikačních pravidel pro jednoznačné určení silniční sítě je jedním z cílů práce. Důležité bude také vhodné nastavení parametrů segmentace, která je nedílnou součástí objektové klasifikace obrazu. Dalším z cílů je ověření přenositelnosti klasifikační báze na jiné území. Výsledky by měly dát odpověď na to, zda vytvořený postup je možné aplikovat i nad jinou lokalitou, a také, zda využití dvou typů dat může přinést kvalitnější výsledky.

Testované oblasti se nacházejí v České republice a jedná se o příměstské krajiny, takže zastoupení krajinných prvků je poměrně široké. Diskutována bude především možnost odstranění ploch, které jsou pokryty stejným materiálem, ale silnicemi nejsou (budovy, parkoviště). Na základě znalostí z literatury bude sestavena klasifikační báze, která bude pracovat jak s družicovými daty QuickBird, tak s daty z leteckého laserového skenování. Výsledky klasifikace budou porovnány s aktuálními daty existující geografické databáze (ZABAGED).

Klíčová slova: OBIA, silnice, ALS, QuickBird, ZABAGED

Classification of road network from airborne laser scanning data and from remote sensing images with high resolution

Abstract

Object classification of land cover is currently one of the methods of remote Earth exploration. Road network classification only is unique because it is covered with anthropogenic material and has different characteristics than other elements of the landscape. This work deals with the possibility of using a combination of data from airborne laser scanning and high resolution optical data for detection of the road network in the specific area. The premise is that the use of two different types of data could provide better results, because airborne laser scanning data provide very precise information about the position and height of the point, while satellite data of very high resolution represent the real landscape. Searching for suitable features and classification rules for unambiguous determination of the road network is one of the objectives of the work. Segmentation parameters will also be important for object classification. Another objective is to verify the transferability of classification schemes into the other scene. The results should present a response on whether a procedure can be applied over a different location and also that the use of two types of data can bring better results.

The tested areas are located in the Czech Republic and there are types of suburban landscape, so the representation of landscape elements is quite wide. The discussion in particular will be led about the possibility of removing areas that are covered with the same material, but they do not represent roads (e.g. buildings, parking places). Classification base will be set up according to knowledge of literature. It will work with both the QuickBird satellite data and airborne laser scanning data. The classification results will be compared with actual data of existing geographic database (ZABAGED).

Key words: OBIA, roads, ALS, QuickBird, ZABAGED

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	9
1 ÚVOD	10
2 VSTUP DO PROBLEMATIKY A REŠERŠE LITERATURY.....	11
2.1 LETECKÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ	11
2.1.1 <i>Skener</i>	12
2.1.2 <i>Prvky orientace a inerciální měřicí jednotka</i>	13
2.1.3 <i>Data LLS</i>	14
2.1.4 <i>Možnosti zpracování dat z leteckého laserového skenování</i>	15
2.2 DRUŽICOVÁ DATA.....	20
2.2.1 <i>Družicová data s velmi vysokým rozlišením</i>	22
2.3 KOMBINACE DAT	25
2.4 PROBLÉMY SPOJENÉ S DETEKCÍ KOMUNIKACÍ.....	26
2.5 KLASIFIKACE DAT	27
2.5.1 <i>Objektově orientovaná klasifikace</i>	28
2.6 ZABAGED	32
3 LOKALITA.....	33
4 POUŽITÁ DATA A SOFTWARE.....	35
4.1 DRUŽICOVÁ DATA	35
4.2 DATA ALS	36
4.3 SOFTWARE.....	36
5 METODIKA.....	36
5.1 ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ	37
5.2 ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH DAT.....	39
5.3 MULTIMEŘÍTKOVÁ SEGMENTACE OBRAZU	41
5.4 KLASIFIKACE HOMOGENNÍCH PLOCH	45
5.5 DRUHÁ SEGMENTACE A KLASIFIKACE OBRAZU	48
5.6 PŘENOSITELNOST KLASIFIKAČNÍ BÁZE	51
5.6.1 <i>První segmentace a klasifikace</i>	54
5.6.2 <i>Druhá segmentace a klasifikace</i>	56
6 VÝSLEDKY	58
7 DISKUZE.....	62
8 ZÁVĚR.....	66

9	ZDROJE	67
	SEZNAM PŘÍLOH	73

Seznam použitých zkratk

ALS (airborne laser scanning) – letecké laserové skenování (LLS)

DSM (Digital Surface Model) – digitální model povrchu (DMP)

DTM (Digital Terrain Model) – digitální model reliéfu (DMR)

GPS (global position system) – globální družicový polohový systém

IMU (Inertial measurement unit) – inerciální měřicí jednotka

LIDAR (light detection and ranging) – laserový skener

NIR (Near InfraRed) – blízké infračervené

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – normalizovaný diferenční vegetační index

OBIA (Object - Based Image Analysis) – objektově orientovaná analýza obrazu

RMSE (Root Mean Square Error) – střední chyba

UTM (Universal Transverse Mercator) – úhlojevné válcové sečné příčné Mercatorovo zobrazení, kartografické zobrazení používající elipsoid WGS 84

WGS 84 (World Geodetic System) – vojenský souřadnicový systém, referenční plochou je elipsoid

WMS (web map service) – webová mapová služba

Seznam obrázků a tabulek

TABULKA 1 - ZÁKLADNÍ INFORMACE O DRUŽICI QUICKBIRD	24
TABULKA 2 - ANALÝZA TYPŮ OBJEKTŮ, KTERÉ MOHOU BÝT ZÍSKÁNY ZE SNÍMKŮ DRUŽICE QUICKBIRD ..	25
OBR. 1 CHESSBOARD SEGMENTATION (ZDROJ: ECOGNITION GUIDE, 2012).....	30
OBR. 2 QUAD TREE SEGMENTATION (ZDROJ: PŘEDNÁŠKA ZTI - OBIA, 2010)	31
OBR. 3 MULTIMERÍTKOVÁ SEGMENTACE OBRAZU (ZDROJ: PŘEDNÁŠKA ZTI – OBIA, 2010)	31
OBR. 4 LOKALITA OBCE JIRNY (ZDROJ: WWW.MAPY.CZ)	34
OBR. 5 LOKALITA OBCE MODLETICE (ZDROJ: WWW.MAPY.CZ).....	35
OBR. 6 VRSTVA BUDOV Z LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ – JIRNY.....	38
OBR. 7 VRSTVA VEGETACE Z LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ - JIRNY	38
OBR. 8 VÝŘEZ Z DRUŽICOVÉHO SNÍMKU NAD OBCÍ JIRNY	41
OBR. 9 VÝSLEDEK PRVNÍ SEGMENTACE NAD OBCÍ JIRNY	43
OBR. 10 OBLAST ŠPATNĚ SEGMENTOVANÉ CESTY	43
OBR. 11 NOVÁ SEGMENTACE PRVNÍ ÚROVNĚ OBRAZU NAD OBCÍ JIRNY.....	45
OBR. 12 VÝSLEDEK PRVNÍ KLASIFIKACE - JIRNY	47
OBR. 13 DRUHÁ SEGMENTACE OBRAZU - JIRNY	48
OBR. 14 VÝSLEDEK KLASIFIKACE TŘÍD BUDOV A LESŮ NAD OBCÍ JIRNY	49
OBR. 15 VÝSLEDEK OBJEKTOVÉ KLASIFIKACE NAD OBCÍ JIRNY	51
OBR. 16 VÝŘEZ Z DRUŽICOVÉHO SNÍMKU NAD OBCÍ MODLETICE	52
OBR. 17 VRSTVA BUDOV Z LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ – MODLETICE	52
OBR. 18 VRSTVA VEGETACE Z LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ – MODLETICE	53
OBR. 19 VÝSLEDEK PŘENESENÉ KLASIFIKAČNÍ BÁZE - MODLETICE	54
OBR. 20 VÝSLEDEK PRVNÍ SEGMENTACE NAD OBCÍ MODLETICE.....	54
OBR. 21 VÝSLEDEK PRVNÍ KLASIFIKACE NAD OBCÍ MODLETICE.....	56
OBR. 22 DRUHÁ SEGMENTACE NAD OBCÍ MODLETICE	57
OBR. 23 VÝSLEDEK OBJEKTOVÉ KLASIFIKACE - MODLETICE	58
OBR. 24 POROVNÁNÍ VÝLEDKU KLASIFIKACE SILNIC S DRUŽICÍ QUICKBIRD - JIRNY.....	59
OBR. 25 POROVNÁNÍ VÝLEDKŮ PROBLEMATICKÉ OBLASTI - JIRNY	60
OBR. 26 POROVNÁNÍ VÝLEDKŮ PROBLEMATICKÉ OBLASTI - MODLETICE.....	61
OBR. 27 POROVNÁNÍ VÝLEDKU KLASIFIKACE SILNIC S DRUŽICÍ QUICKBIRD - MODLETICE	62

1 Úvod

Cílem práce je získání silničních linií z oblasti, nad kterou bude použita kombinace dvou typů dat. V tomto případě se jedná o družicová data s velmi vysokým rozlišením a o data získaná z leteckého laserového skenování. Oba typy dat mají své výhody i nevýhody. Družicová data s velmi vysokým rozlišením poskytují reálný a detailní pohled na zemský povrch, ale jsou ovlivněny oblačností, pod kterou nedokážou proniknout. Pořízení družicového snímku s velmi vysokým rozlišením je také značně nákladné a v praxi se nevyužívá pro celou Zemi, protože snímání by trvalo příliš dlouhou dobu a během něho by mohlo dojít ke změně podmínek. Data leteckého laserového skenování obsahují mnoho informací a jsou schopny poskytnout velmi husté bodové mračno. S velkým objemem dat, ale souvisí velký nárok na výpočetní techniku a také na programy, které dokážou s daty z leteckého laserového skenování pracovat a získat z nich veškeré informace.

Klasifikace silniční sítě z jednoho typu dat je běžnou praxí. Za použití rozdílných postupů je možné získat různé výsledky. Většina autorů dokázala vytvořit klasifikační bázi, která byla velmi dobře funkční nad zkoumaným územím, ale sami uvádějí, že v případě, že by byla použita nad jiným místem, tak by výsledky nemusely být srovnatelné. Někteří autoři ve svých pracích uvádějí, že použití jednoho typu dat je v určitých oblastech dostačující, ale pokud chceme dosáhnout kvalitnějších výsledků je lepší data kombinovat. Aby výsledky byly perfektní, bylo by dobré doplnit klasifikaci o další příznaky, které mohou poskytnout právě jiná data.

Na území České republiky se nachází silniční síť o celkové délce 55 716,4 km (stav k 1. 1. 2013; ŘSD, 2013). Z toho 751,2 km připadá na dálnice a 6 250 km na rychlostní silnice a silnice I. třídy. Velký podíl mají i silnice II. třídy, které mají celkovou délku 14 542,9 km a na některých místech České republiky jsou důležitou spojnici. Tuto skutečnost ovlivnilo také to, že některé silnice I. tříd byly degradovány na silnice II. tříd, jelikož je nahradily rychlostní silnice a dálnice. Komunikace v České republice se konstruuje na různé šířky dle způsobu využití a dle budoucí maximální povolené rychlosti. Silniční a dálniční síť v České republice je tvořena různými materiály a dochází k častému „záplatování“ jednotlivých úseků a tím pádem se mohou některé části komunikací po vizuální stránce velmi lišit. V průběhu let dochází také k pokládání nových povrchů na stávající komunikace a některé úseky mají tedy jiné hodnoty odrazivosti než ty původní. Pro získání kvalitní klasifikační báze je nutné mít data pořízená ve stejné době, jelikož při současném trendu výstavby silnic a dálnic může dojít k tomu, že na jednom typu dat je již silnice dokončena, ale na druhém je viditelná pouze část, případně stavba úseku ještě ani nezačala.

Cílem práce je vytvořit funkční klasifikační bázi, která by byla aplikovatelná i na jiná území s podobným krajinným pokryvem. Hlavním přínosem je kombinace dvou zdrojů dat – družicových s velmi vysokým rozlišením a dat z leteckého laserového skenování. Družicová data s velmi vysokým rozlišením nabízejí velmi reálný pohled na zemský povrch, ale do klasifikace vstupují především za účelem rozdělení krajinných prvků na základě barvy. Oproti

tomu data z leteckého laserového skenování poskytují především informace o výšce a intenzitě jednotlivých typů krajinného pokryvu. Oba druhy dat by se tedy měly doplňovat o ty informace, které jim scházejí. Na základě využití kombinace obou zdrojů dat by mělo dojít ke kvalitnějším výsledkům než v případě jednoho typu. Klasifikační pravidla budou nejprve vytvořena nad jedním územím a poté budou použita nad druhým územím a půjde mimo jiné o ověření možnosti přenositelnosti klasifikační báze. Zkoumaná území se nacházejí v České republice a obsahují jak dálnice, tak klasické silnice, ale i komunikace uvnitř zástavby, takže bude možné porovnat výsledky pro různé typy komunikací.

2 Vstup do problematiky a rešerše literatury

Detekce silniční sítě se v současné době provádí z mnoha typů dat s rozdílnými výsledky. Syed (2005) využil kombinaci laserových a optických dat pro klasifikaci prvků krajinného pokryvu. Samotná lidarová data využil ve své práci Yong Hu (2003), který pracoval především s intenzitou a výškou daných dat. Veškeré výsledné výstupy z lidarových dat jsou závislé především na době snímání, na hustotě bodového mráčka a metodě zpracování. Kumagai et al. (2001) provedli extrakci silnic z družicových snímků vysokého rozlišení. Jími navrhovaná metoda je založena na analýze histogramů vytvořených z pixelů, které jsou s určitostí silnicemi, a tímto způsobem na nalezení vlastností typických pro silnice. Znalost typických vlastností komunikací následně umožnila jejich extrakci v celém snímku.

V této kapitole budou představeny základní charakteristiky lidarových dat a dat s vysokým rozlišením a jejich uplatnění v oblasti detekce zemského povrchu, zejména silniční sítě. Dále budou definovány výhody kombinace obou uvedených typů dat a bude popsána objektivě orientovaná klasifikace. Poslední částí této kapitoly bude popis základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED), která bude sloužit pro porovnání výsledků klasifikace.

2.1 Letecké laserové skenování

V české literatuře a zejména v publikacích evropských autorů se často uvádí pod zkratkou ALS pocházející z anglického výrazu Airborne Laser Scanning. V české literatuře se můžeme setkat ještě s pojmem LLS (letecké laserové skenování). Kromě tohoto označení lze převážně v mimoevropských odborných kruzích narazit také na termín LIDAR (Lemmens, 2007), jež je akronymem anglického Light Detection And Ranging. Volně lze tento termín přeložit jako technologii určenou k detekci objektů a měření vzdálenosti k těmto objektům za pomoci světelného elektromagnetického záření (Jaroš, 2011). Ačkoliv je tato technologie relativně mladá, nachází uplatnění v mnoha praktických aplikacích, jako je tvorba digitálních modelů terénu a povrchu, 3D modelu města, analýza vegetačního pokryvu, sledování nadzemních vedení apod. (Dolanský, 2004).

Princip LLS spočívá v měření vzdálenosti, kterou urazí světelný (laserový) paprsek mezi zdrojem záření (skener na palubě letadla) a zemským povrchem. Při kontaktu s povrchem se část paprsku odráží zpět k měřicí stanici, kde je zachycena detektorem. Vzdálenost je určena

časem mezi vysláním paprsku a jeho zpětným přijetím po odrazu od terénu a od jiných objektů na zemském povrchu. Současně je v okamžiku vyslání laserového pulsu pomocí navigačních systémů letadla (přístroj GPS, inerciální měřící jednotka) měřena přesná poloha skeneru, rychlost a směr letu. Kromě vzdálenosti je pro určení polohy snímaného území nezbytná znalost úhlu, pod kterým byl paprsek k povrchu vyslán, který eviduje skenovací jednotka. (VÚV TGM, 2012)

Laserový paprsek je během průchodu zemským pokryvem postupně odrážen a jeho část může proniknout až na samotný terén. Přístroje jsou schopny vyhodnotit pořadí jednotlivých odrazů v rámci jednoho paprsku. V případě vícenásobného odrazu jsou z prvního odrazu získány informace o povrchu (koruny stromů, střechy budov) a z posledního o samotném terénu. Výsledkem jsou datové vrstvy popisující různým způsobem tvar zemského povrchu či reliéfu. Protože hustota skenovaných bodů se pohybuje v řádu jednotek na metr čtvereční, je výsledný model terénu velmi podrobný. (VÚV TGM, 2012)

Mezi hlavní výhody leteckého laserového skenování patří velká hustota naměřených dat v krátkém časovém intervalu, možnost použití i za tmy, nezávislost na oblačnosti a vysoká přesnost získaných dat (GEODIS, 2012). Pomocí laserových skenerů může být digitálně rekonstruován tvar jakéhokoli tělesa, od soch a architektonických památek přes skalní masívy až po rozsáhlé podzemní komplexy. Dále to může být například mapování koncentrací polutantů v atmosféře, měření atmosféry, ozónové vrstvy a jiných jevů v atmosféře nebo i měření rychlosti projíždějících vozidel. Praktické využití lidarů je i v geodetické oblasti pro mapování (rekonstrukci) zemského povrchu (Dolanský, 2004). Jedná se především o budovy, tvary střech, cestní síť, ale i o hustotu lesních porostů, výšku stromů nebo terénní hrany.

2.1.1 Skener

V současné době se používají pulzní a kontinuální laserové systémy. Pulzní systémy měří čas mezi vysláním krátkého světelného pulzu a jeho zpětným přijetím na přijímači. Kontinuální laserové systémy měří rozdíl fáze mezi vyslaným a přijatým signálem (Mallet, Bretar, 2009). Letecký laserový skener poskytuje přesnost, rychlost a možnost operativního použití. Je možné ho zařadit mezi aktivní digitální senzory – vysílá energii a přijímá zpět signál po odrazu v digitální podobě. Skládá se ze zdroje laserového záření, detektoru elektromagnetického záření, optické soustavy, mechanického prvku a velmi přesných hodin (Dolanský, 2004).

Nejčastěji používaným zdrojem záření jsou pevnolátkové lasery rubínové nebo Nd:YAG, kde je aktivním materiálem izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný ionty neodymu (Encyclopedia, 2012). Emitované záření má vlnovou délku obvykle v rozmezí 500 – 1500 nm (Baltsavias, 1999), nejčastější hodnoty jsou však 1060 a 1500 nm, jedná se tedy o záření z infračervené části spektra (Pfeifer, Briesse, 2007; Lemmens, 2007). Podobně jako při multispektrálním snímání, i laserová data nesou informace o odrazivosti jednotlivých objektů na povrchu, i když pouze pro uvedenou vlnovou délku.

Jako detektory bývají používány světlocitlivé diody, spektrálně synchronizované na stejnou vlnovou délku jakou má vysílané laserové záření. Protože svazek paprsků laserového záření je vyslán směrem k objektu, od kterého se odražen vrací k detektoru, musí být detektor velmi citlivý (uvažujeme-li difuzní odraz – energie světla klesá s druhou mocninou vzdálenosti). Lasery v lidarech jsou používány jak v pulzním, tak i v kontinuálním režimu s fázovou modulací. (Dolanský, 2004)

Koncentraci záření do úzkého svazku včetně souososti detektoru a emitru zajišťuje optická soustava, která bývá zpravidla reprezentována polopropustným hranolem. Tento hranol (nebo zrcadlo) bývá umístěn na mechanickém prvku, který zajišťuje směřování paprsku vždy pod jiným úhlem. Tímto způsobem je zajištěno snímání určité roviny nebo prostoru, aniž by se muselo otáčet celým zařízením. (Dolanský, 2004)

Poslední částí lidarů jsou velmi přesné hodiny (0,05 a 0,2 ns), které mají za úkol měřit čas od vyslání paprsků po jejich detekci na detektoru. Ze znalosti rychlosti šíření světla lze určit vzdálenost lidarů od objektu, a tedy ze znalosti směru vyslaného svazku paprsků a odvozené vzdálenosti určit polohu každého měřeného bodu. U kontinuálního režimu laseru je navíc paprsek frekvenčně modulován a vzdálenost je určována za pomoci fázového posunu. (Dolanský, 2004)

2.1.2 Prvky orientace a inerciální měřicí jednotka

Prvky vnější orientace skeneru, odpovídající okamžiku vyslání laserového pulzu, jsou zjištěny navigačním systémem, jehož součástmi jsou palubní aparatura GPS a inerciální měřicí jednotka (IMU). Inerciální měřicí jednotka je zařízení pro inerciální navigaci, obsahující gyroskopy a akcelerometry, které určují nezávisle na prostorové poloze senzoru (letecké kamery, laserového skeneru apod.) jeho úhlové prvky vnější orientace vůči přijatému souřadnicovému referenčnímu systému. Měří zrychlení ve třech osách a rotace podél těchto os (VÚGTK, 2013). Ze zrychlení je možné dopočítat rychlost a z ní pak změnu polohy.

IMU se skládá ze skupiny gyroskopů měřících náklony nosiče (rotační pohyby) a akcelerometrů, schopných ze znalosti výchozí polohy a změny zrychlení ve třech základních směrech dopočítat polohu v době měření. Je tedy zřejmé, že pro určení všech šesti polohových parametrů by postačovalo pouze zařízení IMU. V praxi se však využívá v kombinaci s GPS přijímačem, což umožňuje eliminovat chyby, ke kterým by docházelo při měření jednotlivými zařízeními odděleně (Kilian et al., 1996). Ve snaze dosáhnout co nejpřesnějších výsledků je aplikován postup diferenciálního GPS (DGPS). Ten vychází z předpokladu, že měření polohy na dvou velmi blízkých přijímačích jsou zkreslena obdobnými chybami (např. vlivem atmosféry, hodinami družice,...). Proto se do systému zavádí tzv. referenční stanice se známými velmi přesně zaměřenými souřadnicemi. Ta zároveň měří svoji polohu s využitím družicového signálu, přičemž porovnání polohy získané z družic s polohou předem známou umožňuje stanovit odchylky. Z nich jsou následně vypočteny potřebné korekce a těmi jsou dále

zpřesňována měření probíhající na oněch velmi blízkých zařízeních (v našem případě nosič měřicí aparatury). (Čábelka, 2008)

Vzhledem k tomu, v jak krátkých časových intervalech měření probíhá, je velmi důležitá precizní synchronizace všech zúčastněných zařízení. Proto jsou systémy LLS vybaveny také kontrolní (někdy také označované jako řídící) jednotkou, která pomocí signálu PPS (pulse per second) synchronizuje časy v jednotlivých zařízeních s časem získaným z přijímače GPS (Morin, 2002). Veškerá měřená data (úhel, délka) jsou tedy provázána s časem vnitřních hodin a dále pomocí PPS s GPS časem (Dolanský, 2004).

2.1.3 Data LLS

První aktivní senzory tohoto typu, určené pro letecké nebo satelitní nosiče, byly zkonstruovány na začátku sedmdesátých let minulého století. Poskytovaly však pouze jednorozměrné profily podél dráhy senzoru (ve směru nadiru) podle sekvence jednotlivých pulzů (Mallet, Bretar, 2009). Aby se sběr dat co nejvíce zefektivnil, realizuje se v současné době snímání povrchu zároveň ve dvou směrech, což značně zvětšuje velikost plochy, již lze nasnímat během jednoho přeletu. Pohyb v podélném směru (směr letu) je zajištěn samotným pohybem nosiče, kterým mohou být, kromě nejčastěji využívaných letadel, také helikoptéry, nasazované zejména v nepřehledném, silně členitém terénu (Pfeifer, Brieše, 2007). Výška letu je poměrně variabilní s obvyklými hodnotami mezi 400 a 1000 m (Baltsavias, 1999). Vychylování měřicího paprsku v příčném směru zajišťuje skener. Úhel, pod kterým jsou paprsky k povrchu vysílány, se označuje jako zorné pole skeneru. Jeho velikost se tradičně pohybuje od 7 do 30 stupňů (Pfeifer, Brieše, 2007), moderní systémy však dovolují pracovat až s dvojnásobně velkým úhlem (Lemmens, 2007). Velikost zorného pole udává společně s výškou letu a skenovací frekvencí hustotu bodů ve směru skenování. Obecně platí, že s rostoucí frekvencí skenování, nízkou letovou výškou a malým zorným polem se hustota zvětšuje a naopak. Na konečné hustotě bodů ve směru letu se pak podílí především letová rychlost nosiče (Wehr, Lohr, 1999).

Datovým výstupem ze skeneru je tzv. mračno bodů. Jedná se o nepravidelný shluk bodů se známými 3D souřadnicemi (X, Y, Z), ve kterém se vyskytují chyby či šum způsobený např. vlivem stavu atmosféry v okamžiku měření, nebo náhodnými odrazy (VÚV TGM, 2012). Hustota bodů může ve specifických a výjimečných případech dosahovat až 100 bodů/m², obvykle ale nepřesáhne 25 bodů/m² (Mallet, Bretar, 2009). S rostoucí hustotou dat narůstá jejich objem a časová náročnost jejich zpracování. Moderní lidarové systémy jsou schopny skenovat rychle velké plochy a vytvářejí přesné bodové mraky s polohopisnou přesností do 1 metru a s vertikální přesností okolo 15 – 20 cm (Yong Hu, 2003). Mnoho lidarových systémů shromažďuje, kromě rozsahu údajů, intenzitu odraženého signálu, vícenásobný odraz (až pětinasobný) pro každý pulz a snímky pořízené digitálními fotoaparáty (Mohamed et al., 2001; Optech, 2003).

Surová data ALS jsou zpravidla upravována do dvou typů digitálních modelů. Jedná se o tzv. model povrchu (DSM) a model terénu (DTM). DTM (Digital Terrain Model) je digitálním modelem reliéfu (DMR), který představuje digitální reprezentaci průběhu topografické plochy georeliéfu. Reliéf je v tomto případě bez jakéhokoliv pokryvu, ať už přírodního původu nebo antropogenního (stromy, budovy, mosty apod.). Používá se pro hydrologické analýzy, v geologii, geografii ve studiích užití území a mnoha dalších aplikacích. Jedná se o digitální reprezentaci reliéfu zemského povrchu, která je složena z dat a interpolačního algoritmu, který mj. umožňuje odvozovat nadmořské výšky mezilehlých bodů. DSM (Digital Surface Model) představuje digitální model povrchu, který je tvořen digitálním modelem reliéfu, ale je doplněn o přírodní i antropogenní pokryv (například budovy, mosty apod.). (GEODIS, 2012)

Rozdíl mezi oběma digitálními modely spočívá v tom, které odrazy laserového impulsu jsou do výpočtu zahrnuty. Pokud se v trase laserového paprsku při jeho cestě k zemskému povrchu nacházejí nějaké menší překážky, např. koruny stromů či nadzemní elektrické vedení, část impulsu se od nich odrazí (průměr laserového paprsku u země mívá několik desítek centimetrů). Z jednoho vyslaného impulsu je tak často zaznamenáno několik odrazů. Obecně lze říci, že pokud jsou ve výpočtu zahrnuty první odrazy, vzniká model povrchu včetně vegetace a nadzemních objektů (DSM). Pokud jsou použity jen poslední odrazy, vzniká model holého terénu (DTM), ze kterého mohou být navíc odfiltrovány nežádoucí objekty, jako např. budovy. (John, 2010)

2.1.4 Možnosti zpracování dat z leteckého laserového skenování

Zpracování dat ALS začíná klasifikací surových dat, ale výsledný počet klasifikovaných dat je omezen. Ruční editace mračna bodů, které získáme z leteckého laserového skenování povrchu, je časově náročná, a proto existuje několik automatizovaných postupů, které provedou editaci bodů efektivně a s dostatečnou přesností. Jedná se především o morfologické filtry, filtry založené na porovnání sklonu, filtry používající vyrovnání metodou nejmenších čtverců a filtry, které kombinují několik datových typů. Všechny uvedené filtry se liší výsledkem, který je závislý na tvaru terénu, zástavbě a také hustotě získaných bodů (Dolanský, 2004). Filtrace předchází samotné klasifikaci obrazu, protože slouží k odstranění bodů neležících ve zkoumané oblasti. Při zpracování dat ALS se využívají hlavně morfologické filtry, filtry založené na porovnání sklonu a filtry s využitím lineární predikce.

Morfologické filtry se používají pro zpracování digitálního obrazu, především k rekonstrukci tvaru objektu. Slouží k vyplnění mezer („děr“) v obraze nebo naopak k oddělení spojených oblastí. Dokážou také zjednodušit tvar objektů při zachování charakteristického tvaru nebo naopak zdůrazní strukturu objektu. Základními filtry jsou dilatace a eroze, kombinací obou typů vznikají další filtry, kterým se říká otevření a uzavření. Pro filtraci se definuje strukturální element, s jehož pomocí je prováděna analýza v celém prostoru zdrojových dat. (Dolanský, 2004)

Dalšími možnostmi, jak třídit data leteckého laserového skenování, jsou filtry založené na porovnání sklonu (Vosselman, 2000) a filtry s využitím lineární predikce (Kraus, Pfeifer, 1998). Filtry založené na porovnání sklonu testují, zda bod leží nebo neleží na terénu. Porovnávají každý bod s jeho nejbližším okolím, zkoumají výškový rozdíl mezi testovanými body a v závislosti na jejich vzájemné vzdálenosti je definován sklon. Filtry, které využívají lineární predikci, jsou statistickou interpolační metodou, založenou na použití metody nejmenších čtverců. Před samotným začátkem filtrace je ze všech bodů aproximován výchozí model terénu, který bude probíhat ve „střední“ výšce mezi body terénu, vegetace, budov atd. Poté jsou vypočteny odchylky všech bodů od vzniklého modelu terénu a na základě výsledků vzniká model nový (Jaroš, 2011).

Filtrace dat je nedílnou součástí pracovních postupů mnoha autorů, kteří se zabývají problematikou extrakce komunikací. Každý z nich ji používá na jinak upravená data a v jiné části zpracování dat. Obecně se dá říci, že nejčastěji jsou využívány morfologické filtry. Velmi platným zdrojem je metoda dle Yong Hu (2003), který pracuje s kombinací intenzity a výšky dat. Aplikuje ji v městské oblasti a řeší především problematiku stejných materiálů. Nejprve je provedena eliminace bodů, které nevyhovují předpokladům o podobě silnic a dálnic. Poté je využita funkce příslušnosti, která udává do jaké míry je pixel dálnicí (silnicí). Na základě těchto znalostí vznikne model, který bude nutno dále upravovat. Původní lidarové body budou porovnány s digitálním modelem reliéfu a bude možné vyloučit některé body, které budou příliš nízko nebo příliš vysoko nad modelem reliéfu. Tímto krokem dojde k eliminaci příliš vysokých bodů, jako jsou budovy, stromy apod. Poté bude provedena samotná klasifikace, na základě které budou odstraněny objekty s obsahem malého množství bodů (např. < 10 000), jelikož vycházíme z předpokladu, že silnice a dálnice jsou delší pásy, které jsou propojeny.

Clode, Kootsookos, Rottensteiner využívají metodu hierarchické klasifikace k rozlišení cest, která začíná vytvořením DTM s použitím postupné morfologické operace otevření s různou velikostí strukturních elementů. Metoda hierarchické klasifikace je mimo jiné založena na předpokladu, že silnice leží na nebo blízko DTM. Tato skutečnost platí pro většinu silnic, ale netýká se mostů, tunelů a zvýšených silnic (mimoúrovňové křižovatky). Lze tedy určit alespoň nějakou toleranci vzdálenosti od DTM a tím je možné nebrat v úvahu některé body. Každý bod je kontrolován, jak z hlediska platného rozsahu intenzity, tak rozdílu výšek z DTM. Vzniknou tedy oblasti, které by mohly být silnicemi a je nad nimi použita série filtrů, které vedou ke zpřesnění klasifikace. Výsledné snímky také ovlivňují typy silnic, které očekáváme, že najdeme. Diskutuje se o přítomnosti „skoro“ silnic, kterými jsou v tomto případě (Clode, et al., 2004) soukromé cesty a parkoviště. V tomto článku se také pokoušejí najít metody k jejich odstranění. Uvedená metoda hierarchické klasifikace byla aplikována na oblast města Sydney – Fairfield. Tato krajina byla zvolena záměrně kvůli její rozmanitosti – nejedná se pouze o městskou zástavbu, ale také o hustě zalesněné okolí potoka, které je z mnoha důvodů v testované oblasti důležité.

Dalším faktorem, který pomůže zúžit spektrum použitých bodů je určení materiálu (v tomto případě asfalt) a jeho intenzity odrazu. Povrchový materiál je u většiny hlavních silnic stejný a je tedy možné ho lépe detekovat. Získáme tak snímek, který obsahuje všechny veřejné silnice, soukromé silnice, parkoviště a šum (auta na silnicích, střechy budov apod.). Největším problémem jsou parkoviště, která bohužel mají rozdílnou velikost a tím pádem je velmi těžké je plošně vyloučit. Nastavením maximální šířky je možné odstranit ty větší z nich, ale ty menší, často přiléhající k budovám takto vymazat nejdou (Clode, et al., 2004).

Relativní oddělení mezi pozemními prvky (tj. asfaltová silnice, tráva, budova a strom) budou porovnány pomocí intenzity dat, a to i přesto, že je „noisy“ (Clode, et al., 2004) a pohybující se objekty (např. automobily) a (bílý nebo žlutý) liniové značení na silnicích má také za následek intenzivní „speckle“ v obraze. Je zjištěno, že oddělitelnosti jsou velmi vysoké pro silnice vs. tráva a silnice vs. strom (Song et al., 2002). Pro odstranění chybné klasifikace z posledního odrazu je dobré využít vegetační model, který je odvozen z rozsahu dat prvního a posledního odrazu a představuje propustnost vysoké vegetace (Yong Hu, 2003).

Detekcí silnic v hustě zalesněné oblasti se zabývá také Rieger, et al. (1999) ve svém článku. Zabývá se lokalitou výzkumného lesa Vídeňské zemědělské univerzity. Les se nachází v kopcovitém terénu s nadmořskou výškou od 350 do 750 metrů a obsahuje vegetaci typickou pro střední Evropu. V tomto článku byla snaha extrahovat lesní cesty v horských oblastech z DTM. Byla použita letecká laserová data, získána v zimním a letním období. V článku od Hatger, Brenner (2003) jsou lidarová data použita spolu s existující databází informací k odhadu parametrů silniční geometrie. V některých případech extrakce byly detekovány linie, které sloužily zároveň ke zlepšení DTM. Kombinace liniových a bodových vlastností extrakce potom byla použita k extrakci výsledných linií.

Problematika správného využití informací z lidarových dat je komplikovanější, vzhledem k tomu, že většina systémů registruje intenzitu odraženého laserového paprsku, ale nedokážou ji následně využít při extrakci. Je to také dáno velikostí stopy (20 – 30 cm) a průměrnou bodovou hustotou 1 bod na 1,3 m², což způsobuje, že je intenzita obrazu pod vzorek a příliš rozostřená (Rottensteiner et al., 2003, Vosselman, 2002). Akel et al. (2003) také zpracovávali lidarová data a debatují zde nad metodou extrakce DTM v městských částech nejprve pomocí odhadu DTM ze současné sítě silnic.

V článku od Clode, et al. (2004) je detekce založená na souvislé síti obrazových pixelů. Bylo uvažováno více kritérií – vzdálenost od DTM, intenzita, spojitost a normalizovaný bod hustoty. Pixely se jeví jako viditelné silné linie, které tvoří silniční síť obsahující všechny veřejné komunikace. Výsledný obraz může být použit k odvození (získání) informací jako je střednice, hrany a šířka. Autoři uvádějí, že tato metoda, která je založená na pravidlech, je efektivní, ale jednoduchá. Přesnost metody byla na stejné úrovni jako v práci uvedené lepší algoritmy. Výsledky z této metody budou lepší, v případě, že ji použijeme na lidarová data v neprůmyslové nebo komerční oblasti. Pro poloaautomatickou extrakci využívají „snakes“,

kteřé jsou běžně používány v digitálních obrazech jako liniový extrakční nástroj. Výsledky v tomto případě byly velmi dobré.

Rozsah lidarových dat lze použít ke zlepšení analýzy obrazových dat pro detekci silnic v městských oblastech a pomůže rozpoznat objekty, které jsou překryty stíny (Hofmann, 2001). Ale tato metoda vyžaduje, aby městské oblasti byly relativně ploché (rovinaté). Na výšku jsou chodníky připojeny k nepokryté ploše a objevují se jako hladké pásy oddělující bloky ulic ve městě. Proto silnice může být zhruba popsána křížně spojenými stuhami, které mají konstantní odrazivost a velmi nízkou výšku. Za tímto účelem byla na data obsahující intenzitu a výšku použita klasifikace k detekci silničních pásků a silničních středových modelů v městských oblastech. V obraze intenzity se asfaltové silnice jeví jako tmavé stuh (Yong Hu, 2003).

Pokud bod projde zkušební formulací v rozhodování funkce pro silniční třídy, tak to pak bude silniční pixel. Pro extrakci asfaltové silnice je intenzita obrazu rozdělena pomocí dvou prahových hodnot obklopující rozsah intenzity silniční třídy. Funkce příslušnosti je nutná k výpočtu do jaké míry se má pixel klasifikovat jako silnice a je definován algoritmem, který autor ve svém článku podrobně uvádí. U tohoto typu dat může docházet k tomu, že poslední odraz může narazit na zemi v zalesněných oblastech a tím i chybně klasifikovat vegetaci jako vozovku, zatímco první odraz může být správně zařazen do kategorie vegetace. Takže první odraz intenzity dat je vhodnější pro zařazení do zalesněných oblastí. Ale chybná klasifikace z posledního odrazu může být odstraněna pomocí vegetačního modelu.

Druhým zkoumaným typem dat v článku Yong Hu (2003) jsou výšková data. Faktem je, že silnice jsou tenké chodníky nad povrchem terénu. Jakmile je vytvořen digitální neterénní model, je možné získat hrubý model pro silniční stuh pomocí detekce těchto oblastí s nízkým digitálním neterénním modelem výšek.

Jako další byla řešena kombinace obou výše uvedených dat. Spojení intenzity dat a výškových dat může dávat více spolehlivé výsledky silniční detekce. Na jedné straně poskytuje intenzita spektrální odrazivost, která může pomoci identifikovat většinu cest, i když jsou objekty potažené stejným materiálem, který také obsahují. Na druhou stranu, výšková data můžou pomoci identifikovat většinu ne-stavebních a ne-lesních oblastí, i když jsou tyto nízké otevřené plochy jako pastviny také obsaženy. Pomocí informace o výšce budou zastavěné plochy s vyšší nadmořskou výškou než jejich okolí bezpečně odstraněny, zatímco při použití (první odraz) informace o intenzitě jsou jednoduše odstraněny oblasti porostlé vegetací. Takže je možné oddělit silnice od stromů, budovy a pastviny s minimální chybou, pokud použijeme spojení intenzity a výškových dat. V detailu, ve srovnání s komunikací, travní porosty mají různou intenzitu, i když mají nízkou výšku, stromy mají rozdílné hodnoty intenzity i výšky a budovy mají vysoké struktury s výškovými skoky, i když mohou být pokryty nepromokavým asfaltem. Následně je provedena funkce příslušnosti pro integrovanou silniční klasifikaci, která je spočtena jako vážený součet dvou složek, které byly vypočteny dříve. (Yong Hu, 2003)

Nicméně po provedení výpočtu jsou stále zachována parkoviště, protože mají stejnou odrazivost a nízkou výšku jako silnice, naopak mosty a viadukty jsou odstraněny. Je zjištěno, že existují pouze zanedbatelné rozdíly, protože oblasti vysoké vegetace z klasifikace intenzity posledního odrazu byly odstraněny za použití výškové informace z digitálního neterénního modelu. Výsledky segmentace jsou dále zpracovány k výrobě čistých tvarů. Za prvé, počáteční silniční stuhy jsou očištěny odečtením vegetačního modelu, pokud je klasifikace provedena na intenzitě posledního odrazu a tento krok je přeskočen, pokud je použita intenzita prvního odrazu. Dále objekty, které nejsou připojeny k silničním stuhám, jsou odstraněny.

Na základě výše uvedených zdrojů dat autor (Yong Hu, 2003) vytvořil hrubou generovanou silniční síť. Silniční stuhy dávají představu o rozvržení chodníků a nemůže tak být dobře nakreslena silniční síť. Výsledky také nemohou být efektivně zpracovány v GIS. Hrubý popis silničních středových linií (střednic) se získává ztenčováním těchto silničních stuh. Tento model silničních os snižuje výpočetní zátěž a předchází nejasnostem. Nicméně model silničních os je geometricky nepřesný a kartograficky nepoužitelný.

Detaily ulic jsou v tomto případě kontrolovány pomocí několika prahů, včetně minimální šířky silnic, minimální délky silnic a maximálního úhlu tolerance. Například, více silničních segmentů bude zjištěno, pokud bude použita malá šířka prahu. Uvedený algoritmus byl testován za použití datasetů, které byly získány v různých oblastech: obytná, městská, horská, příměstská a lesnatá. Spojení dvou radiometrických vlastností, intenzity dat a výškové informace digitálního neterénního modelu, je velmi vhodné při snižování nesprávného zařazení do silničních tříd. Silniční stuhy odpovídají skutečným silnicím stejně jako jejich nalezené překrytí v digitálním ortorektifikovaném čtyřúhelníku, nebo v lidarových snímcích a jejich porovnání s příslušnými silničními vzory. Intenzita prvního odrazu dat je vhodnější pro charakterizování silniční třídy k zabránění nesprávnému zařazení některých vegetačních oblastí do silnic do té doby, než poslední odraz může dorazit na zemský povrch pod stromy. Výsledky klasifikace za použití intenzity posledního odrazu mohou být zdokonalena odečtením vegetačního modelu odvozeného z více návratového rozsahu dat, zatímco výsledky klasifikace za použití intenzity prvního odrazu není nutné zlepšovat, protože vegetace má odlišné hodnoty odrazu než asfalt.

Výsledné silniční pásy nejsou zcela dokonalé kvůli klasifikačním chybám. Některé silnice jsou nově zpevněny betonem, který má větší, ačkoliv bližší hodnotu odrazu než asfalt. To lze vyřešit lidským zásahem k určení poněkud širšího rozsahu intenzity pro silniční třídy, pokud je známá silniční situace. Mosty a viadukty nebyly zjištěny, protože dosahují velkých výšek nad terénem. K vyřešení tohoto problému jsou třeba doplňková data. V situaci, kdy jsou silnice potaženy jinými materiály než je asfalt, odrazové vlastnosti těchto povrchů v intenzitě dat mohou být analyzovány stejným způsobem jako pro asfalt. V některých částech obrazu došlo k tomu, že byly kromě silnic detekovány i parkoviště a vodní plochy. To je dáno především podobnou odrazivostí materiálů a jejich nulovou výškou. K vyřešení problému jsou potřeba pomocná (rozšiřující) data, protože za použití pouze lidarových dat je to velmi obtížné.

2.2 Družicová data

Družicové snímky se v posledním desetiletí staly jedním z nejčastěji využívaných zdrojů geografické informace v mnoha oborech lidské činnosti. Bylo to umožněno zejména rychlým technologickým vývojem v oblasti dálkového průzkumu Země, díky kterému se tento obor přesunul z oblasti výzkumné a vojenské do komerční sféry (GISAT, 2013). Výhod družicových snímků je několik. Především je to vysoká rychlost zmapování území, kdy je v závislosti na rozlišení senzoru za několik vteřin nasnímána oblast o rozloze několika desítek i stovek km². Další výhodou je, že se jedná o metodu bezkontaktní – na daném místě na Zemi se nemusíme vůbec nacházet, čehož se využívá pro mapování vzdálených míst, území postižených přírodními katastrofami nebo jinak obtížně dostupných oblastí. Vysoká je také aktuálnost takto získaných dat, uživatel může svá data získat již několik minut po nasnímání. Na rozdíl od klasických map nebo vektorových dat navíc poskytují uživateli realistický pohled na dané území. Oproti leteckým, pak mají družicové snímky výhodu v podobě většího počtu spektrálních pásem, ve kterých snímají. Nejčastěji se jedná minimálně o jedno pásmo v blízkém infračerveném spektru, které doplňuje tři základní pásma viditelného záření (modré, zelené a červené). Snímek je pak tzv. multispektrální (na rozdíl od snímků panchromatických, které tvoří jediný černobílý snímek pořízený napříč celým viditelným spektrem). (ARCDATA, 2013)

Družicové snímky jsou vytvářeny zaznamenáváním intenzity odraženého nebo emitovaného elektromagnetického záření v určitých intervalech spektra. Atmosféra jako hmotné prostředí v určitých intervalech vlnových délek toto záření výrazně modifikuje především procesy pohlcování a rozptylu. V případě snímání zemského povrchu hrají tyto procesy negativní úlohu – často snímání zcela znemožňují či ovlivňují kvalitu snímků. Na druhé straně pokud objektem zájmu je samotná atmosféra, potom intenzita procesů pohlcování a rozptylu záření koreluje s jevy v atmosféře probíhajícími či s vlastnostmi atmosféry a to může být na družicových snímcích zaznamenáno. (Dobrovolný et al., 2001)

Vlivy atmosféry, jako je absorpce a rozptyl, je možné odstranit pomocí atmosférické korekce, která dokáže eliminovat projevy vysoké oblačnosti a mlhy. Existuje mnoho metod na odstranění vlivů atmosféry, jedná se např. o metodu nejtmašího pixelu, regresní analýzu a modelování atmosférických podmínek (Dobrovolný, 1998). Atmosférické korekce se používají za účelem získání absolutních hodnot naměřeného spektrálního chování, aby bylo možné kvantifikovat jejich vlastnosti (Kolář, 1997).

Družice se pohybují po různých drahách okolo zemského povrchu, které velmi významně ovlivňují kvalitu získaných dat. Dráhy družic můžeme rozdělit podle různých hledisek do několika kategorií:

Podle sklonu k rovině zemského rovníku (inklinace):

- *rovníková dráha* – družice obíhá Země přibližně v rovině zemského rovníku
- *polární dráha* – družice obíhá přibližně v rovině zemských poledníků
- *obecná dráha* - družice se pohybuje po dráze, která není ani rovníková ani polární

Podle výšky a tvaru:

- *nízká dráha* – výška 160 – 2000 km, tvar eliptický, oběžná doba cca 1,5 hodiny
- *střední dráha* – eliptický tvar, výška dráhy cca 2000 – 36 000 km, v DPZ se nepoužívá - výška družice by byla velká, což by znamenalo menší prostorové rozlišení dat, ale přitom ani nemá výhody geostacionární dráhy
- *geostacionární dráha* – výška cca 36 000 km, doba oběhu družice je rovna úhlové rychlosti rotace Země
- *vysoce eliptická dráha* - tvarem velmi protáhlá elipsa, která má perigeum poměrně blízko Země, ale apogeum je od Země dále než 36 000 km. V DPZ se nepoužívá – velké výkyvy ve vzdálenosti od Země by způsobily extrémní zkreslení velikosti pixelu

Specifické dráhy družic:

- *geosynchronní dráha* – dráha družice má takovou výšku (a tvar), že jí odpovídá oběžná doba rovná jednomu siderickému dni, příliš se nevyužívá
- *geostacionární dráha* – specifický případ geosynchronní dráhy, oběžná doba 24 hodin
- *heliosynchronní dráha* - jedná se o specifický případ polární dráhy

Družicová data je možné dělit podle svých rozlišovacích schopností. Nejčastěji se uvádí dělení podle prostorového rozlišení, které je dáno velikostí území na zemském povrchu, jenž odpovídá jednomu pixelu na snímku. Družicová data mohou být rozdělena také podle spektrálního rozlišení, které uvádí, v jakém spektrálním pásmu byla data pořízena, případně v kolika pásmech. Neméně důležité je rozlišení časové, které udává návratnost družice nad stejné místo na Zemi. Toto rozlišení často rozhoduje o tom, kterou družici využijeme, pokud chceme získat ucelenou časovou řadu zájmového území. Většina družic je schopna snímat stejné místo na Zemi přibližně každé tři dny. Výjimku tvoří např. družice Formosat-2, která díky své jedinečné dráze umožňuje snímat stejné místo každý den ve stejnou hodinu a pod stejným úhlem. Další možností dělení družicových dat může být radiometrické rozlišení, které značí počet hodnot (stupňů šedi) v obraze. Nejčastější jsou snímky 11bitové – to znamená, že hodnoty jednotlivých pixelů nabývají hodnot 0 – 2047, v případě starších 8bitových dat jsou to hodnoty 0 – 255. Nové hyperspektrální a radarové systémy mají radiometrické rozlišení 16bitové (GISAT, 2013).

V případě této práce nás bude zajímat především prostorové rozlišení, které dělí družicová data dle velikosti pixelu do čtyř kategorií (ARCDATA, 2012):

- *data nízkého a středního rozlišení* (velikost pixelu v řádu 1000 – 100 m) - senzory pořizující tato data mají velice široký záběr, čímž zaručují pořízení snímků stejného území i několikrát za den. Hodí se především pro globální a kontinentální mapování, sledování rozsáhlých přírodních katastrof, meteorologii, vyhodnocování stavu ovzduší nebo stavu a vývoje sněhové pokrývky a obecně rychle se vyvíjejícím jevům. Data jsou pořizována v intervalu jednoho až několika dní, pouze v multispektrálním režimu (3 spektrální pásma ve viditelném záření a jedno pásmo v oblasti infračerveného záření). Takto

získané snímky se využívají pro mapování v měřítku 1 : 1 000 000. Příkladem takové družice (velikost pixelu) je např. NOAA/AVHRR (1 km), Modis (500 – 1000 m), Meteosat (2, 5 – 5 km).

- *data vysokého rozlišení* (velikost pixelu cca 10 – 50 m) – mají pravidelný několikadenní interval návratu ke stejnému místu na Zemi. Výhodou těchto dat jsou obrovské archivy vedené již od 70. let minulého století. Proto se snímky z těchto družic využívají pro sledování změn v krajině (např. důsledky přírodních katastrof), regionální mapování a plánování, sledování land use/land cover, mapování zemědělských ploch, sledování stavu a vývoje vegetace nebo geologické a geomorfologické mapování. Data jsou často pořizována jak v panchromatickém, tak v multispektrálním režimu, interval snímání je několik dní. Nejznámějšími zástupci této skupiny jsou družice Landsat/ETM+ (multispektrální 30 m, panchromatické 15 m) a SPOT/HRG (multispektrální 10 m, panchromatické 5 m).
- *data velmi vysokého rozlišení* (velikost pixelu cca 5 metrů až desítky centimetrů) – díky velmi vysokému rozlišení lze sledovat velmi detailní podrobnosti povrchu (detaily budov, automobily), ale velké prostorové rozlišení je vyváženo tím, že snímek zabírá jen velmi malou část povrchu. Data jsou pořizována jak v panchromatickém, tak v multispektrálním režimu, interval návratu na stejné místo je 1 – 3 dny. Data velmi vysokého rozlišení jsou vhodná pro podrobné mapování v měřítku 1 : 25 000 až 1 : 5 000, urbanistické studie, 3D modely měst, využívají se často také pro plánování nebo mapování zemědělských aktivit, monitorování povrchových dolů, skládek atd. Díky vysokému prostorovému rozlišení je možné mapovat i detaily, jakou jsou automobily, lodě, budovy apod. Nejznámějšími zástupci jsou družice Ikonos (multispektrální 4 m, panchromatické 1 m), QuickBird (multispektrální 2,5 m, panchromatické 0,6 m) nebo nejnovější Geoeye-1 a WorldView-2 (multispektrální 1,8 m, panchromatické 0,45 m).

2.2.1 Družicová data s velmi vysokým rozlišením

Do této kategorie spadají družicové senzory, které snímají v panchromatickém režimu s rozlišením většinou dvakrát vyšším než v režimu multispektrálním. Díky tomu je pak možné provést tzv. pansharpening, a vytvořit tak multispektrální snímky s vysokým rozlišením převzatým ze snímků panchromatických. Dalším jednotícím znakem těchto družicových senzorů je počet spektrálních pásem – většina z nich snímá ve třech viditelných spektrech odpovídajících barvám červené, zelené a modré a dále v jednom blízkém infračerveném spektru s vlnovou délkou 760 – 900 nm.

Projekt organizace OEEPE (Holland, Guiford, Muray, 2002) však demonstruje, že družicové snímky velmi vysokého rozlišení trpí také některými podobnými neduhy jako digitální mono panchromatické letecké snímky, jako například: pokrytí mraky, problémy způsobené nepřesným georeferencováním, ztížená interpretace objektů v kompaktních urbánních oblastech. K přesnému zachycení objektů by napomohlo především použití stereo snímků a zaostření multispektrálních snímků snímkem panchromatickým.

2.2.1.1 Družice QuickBird

Dne 18. 10. 2001 byla na oběžnou dráhu ve výšce 450 km uvedena družice QuickBird (společnosti DigitalGlobe sídlící v Coloradu, USA) s prostorovým rozlišením 0,6 m v panchromatickém režimu a 2,4 m v multispektrálním režimu. Družice se pohybuje rychlostí 25 560 km/h a doba oběhu je 94 minut. Díky multispektrální informaci ze čtyř pásem se hodí k celé řadě aplikací. Od mapování zemědělské úrody nebo rozšiřující se zástavby v měřítkách od 1 : 1 000 do 1 : 10 000 až po nejružnější aplikace v oblasti telekomunikací, těžby, ropného průmyslu, zemědělství a lesnictví, krajinného plánování nebo mapování a hodnocení přírodních katastrof (ARCDATA, 2013).

Společnost DigitalGlobe (dříve EarthWatch) připravila ke startu svoji třetí družici poté, co její dva předešlé pokusy v letech 1997 (družice EarlyBird, která byla úspěšně vynesena na oběžnou dráhu raketou Start-1 z kosmodromu Svobodny v Rusku, po čtyřech dnech spadla z oběžné dráhy kvůli problémům s napájecí sítí) a 2000 (druhá družice v pořadí, QuickBird1, měla být vynesena na oběžnou dráhu v listopadu roku 2000 z kosmodromu Plesetsk v Rusku, i tento pokus bohužel skončil nezdarem).

Družice QuickBird má několik charakteristických vlastností, mezi které patří např. vysoké prostorové rozlišení a schopnost družice natáčet se jak v rovině letu, tak i napříč dráhy o úhel až 25°. To se projevuje jednak až 544 km širokým pásem na zemském povrchu, v němž se může provádět měření a také schopností pořizovat stereoskopické scény ve směru letu. Překrytí základní stereodvojice je 90%. Rozlišení panchromatických dat se pohybuje v rozmezí od 61 cm při měření v nadiru do 72 cm ve směru pozorování 25°. Výsledkem panchromatických dat jsou černobílé snímky. V multispektrálním módu jsou data pořizována s menším prostorovým rozlišením 244 cm, v nadiru až 288 cm, ale výsledná data jsou ve čtyřech spektrálních pásmech (modré, zelené, červené a blízké infračervené). Velikost scény je zhruba 16,5 km x 16,5 km a polohová přesnost dat je 14 m RMSE. V tabulce 1 jsou shrnuty základní informace o družici QuickBird (ARCDATA, 2013).

Tabulka 1 - Základní informace o družici QuickBird

Datum vypuštění		18. 10. 2001
Provozovatel		Digital Globe, USA
Typ dat		optická, multispektrální
Počet pásem		4
Spektrální rozlišení panchromatické		445 - 900 nm
Spektrální rozlišení multispektrální	viditelné modré	450 - 520 nm
	viditelné zelené	520 - 600 nm
	viditelné červené	630 - 690 nm
	blízké infračervené	760 - 900 nm
Prostorové rozlišení	panchromatické	0,6 m
	multispektrální	2,4 m
Radiometrické rozlišení		11 bitové
Perioda obletu		3 dny
Inklinace		98°
Velikost scény		16 x 16 km
Dráha		heliosynchronní
Výška orbitu		450 km

Poslední charakteristikou družice QuickBird, která nebyla blíže specifikována, je její dráha. Družice QuickBird snímkuje zemský povrch po heliosynchronní dráze. Pohybuje se tedy tak, že překračuje rovník vždy o 25,5° západněji než při předchozím obletu. Navíc se počítá i se stáčením roviny dráhy družice (vlivem gravitačního působení Měsíce a Slunce). Pokud je dráha navržena tak, že se její rovina v prostoru stáčí stejnou rychlostí, s jakou Země obíhá kolem Slunce (tj. cca 1° za den), pak to má za následek, že postavení Slunce – Země - družice je neustále stejné (neboli slunce svítí na povrch v místě B pod stejným úhlem, pod jakým svítí na povrch v místě A, které bylo nasnímáno při předchozím obletu). Data z jednotlivých obletů jsou tedy zcela srovnatelná z hlediska světelných podmínek, které v době pořízení dat na povrchu panovaly.

V tabulce 2 jsou uvedeny výsledky analýzy typů objektů, které mohou být získány z družice QuickBird v měřítkách mapování 1 : 2 500, 1 : 10 000 a 1 : 25 000. Výsledky jsou uvedeny pro tři měřítka, u kterých jsou uvedeny písmena a, n, m. A znamená ano, objekt může být zachycen; n znamená ne, objekt nemůže být úspěšně zachycen a m znamená možná, objekt může být za určitých okolností zachycen (Holland, Boyd, Marshall, 2006).

Tabulka 2 - Analýza typů objektů, které mohou být získány ze snímků družice QuickBird

Objekt	Popis výsledků analýzy	Měřítko 1 : x		
		2 500	10 000	25 000
Domy	Jednoduchá identifikace, možné zachytit jednoduchý tvar, není možné identifikovat výklenky, zákoutí	n	m	a
Ostatní budovy	Jednoduchá identifikace rozlehlých budov, především hospodářských budov; komplexní, mnohaúrovňové a střešní struktury obtížné identifikovatelné	n	a	a
Silnice	Uspořádání silnic zřejmé, obtížně identifikovatelné obruby, bílé linie viditelné	a	a	a
Významné krajinné změny	Velmi jasné identifikovatelné	a	a	a
Zemědělská pole	Jasně viditelné, obtížně klasifikovatelné	m	m	m
Vodní plochy a toky	Jasně identifikovatelné, některé malé toky obtížně identifikovatelné	m	a	a
Vegetace	Dobře definovaná v zaostřených snímcích	a	a	a

Z tabulky 2 vyplývá, že kategorie silnic je na snímcích dobře patrná, respektive jejich uspořádání je viditelné, hůře se sice identifikují obruby silnic, které ale nejsou pro další klasifikaci dat důležité.

Data z družice QuickBird mají široké spektrum použití. Jsou vhodná pro detailní mapování (až do měřítka 1 : 5000) a řadu dalších aplikací, např. 3D modely měst, řízení přírodních zdrojů, urbanismus, telekomunikace, precizní zemědělství, kontrolu zemědělských aktivit, inventarizaci lesních porostů, mapování rozptýlené vegetace, monitorování skládek, rekultivace, mapování dopravních sítí, pojišťovnictví a tvorbu digitálního modelu terénu. (GISAT, 2013)

2.3 Kombinace dat

Rottensteiner et al. (2003) sjednotil lidarová a multi-spektrální data s vysokým rozlišením pro automatickou detekci budov s heterogenním vzhledem (vnějšími okolnostmi), hierarchická integrační technika byla přijata pro detekci budov v městském prostředí. Hofmann (2001) použil objektovou klasifikaci pro detekci budov a silnic z IKONOS dat za použití doplňující výškové informace. Družicová data velmi vysokého rozlišení mají obdobné prostorové rozlišení jako běžné letecké snímky, liší se od nich pouze vyšším počtem spektrálních pásem. Data ALS mají nevýhodu v tom, že neposkytují optické snímky nebo jsou tyto snímky málo kvalitní. Při extrakci komunikací z dat ALS je třeba vzít v úvahu více kritérií – intenzita dat, blízkost k DTM, hustota bodů a spojitost cest. Je proto vhodné tyto data kombinovat s jinými. Lidar poskytuje velmi přesné polohové a výškové informace, ale méně přesné informace o geometrickém tvaru

objektu, zatímco snímky s vysokým rozlišením nabízejí velmi podrobné informace o objektech, jako je spektrální příznak, textura, tvar, atd. Kombinace těchto dvou druhů doplňujících se dat je docela slibná pro detekci budov, 3D modelování města, atd. (Tao and Yasuoka, 2002).

2.4 Problémy spojené s detekcí komunikací

Spojení dat by mělo přinést eliminaci některých problémů, které s vymezením silniční sítě souvisejí. Z dat ALS je zatím stále těžké odfiltrovat podobné (stejně) materiály, objekty na komunikacích a vzrostlou vegetaci v okolí silnic, budov, vrhající stíny v městských zástavbách.

Vzrostlá vegetace se velmi často nachází v okolí komunikací, jelikož sloužila jako větrolamy a sněholamy. Dalším historickým důvodem byla orientační funkce, která dosáhla svého účelu především v zimě. Všechny uvedené významy alejí podél silnic dnes již plně neplatí, ale stále zůstávají platným krajinným prvkem a v současné době mohou okolo silnic stát stromy pouze v určité vzdálenosti, aby neohrožovaly bezpečnost silniční dopravy. Vhodná vzdálenost pro výstavbu stromů od komunikací je stále diskutována a není proto možné stanovit přesnou distanci. Data ALS sice snímají svrchní část koruny, jednotlivá patra a také vlastní terén pod stromy, ale velmi záleží na době snímání, jelikož ta určuje úhel dopadu stínu stromů. Vysoké stromy v blízkosti silnic způsobují neúplnou mozaiku silniční sítě a někdy je tedy třeba provést další klasifikaci. Další skutečností, která ovlivňuje přesnost detekce silnic, je roční doba. Většina stromů podél silnic je listnatá, a podzim je tedy vhodnější dobou pro snímání povrchu než léto. Problém stínů, které vrhá vegetace, ale i elektrické vedení, budovy a objekty v městských oblastech, je možné částečně odstranit tím, že stejnou oblast nasnímáme pomocí více snímků z různých úhlů pohledu, jak se o to pokusil Hedman (2005) ve svém článku. Tyto snímky by, ale musely mít stejné prostorové rozlišení a stejnou kvalitu, aby bylo možné je vhodně použít. Nejen vysoké budovy, ale i příliš mnoho budov blízko sebe způsobuje nemožnost vidět krajinný povrch za nimi. Další možností je využít kombinace různých typů dat, jako tomu je v této práci.

Problematika stínů, které vrhají okolo stojící objekty, se týká nejen otevřených prostor, ale i městské zástavby, kde dochází i k jinému častému jevu, kterým je podobnost použitých materiálů. Ve městech se můžeme setkat se dvěma druhy povrchů – asfaltem a betonem. Oba uvedené materiály jsou v zástavbě použity na více typů objektů, nejen na komunikace. Těmito jinými prvky jsou myšleny rozestavěné budovy, parkoviště, soukromé cesty, dvorky, zídky oddělující jednotlivé obytné části apod. Beton a asfalt mají sice různou, ale velmi blízkou odrazivost. V ideálním stavu je možné odlišit jeden od druhého a třída komunikací tak může mít dva shluky. Ale pokud se tyto materiály používají na silnicích, tak po uvedení silnice do provozu se kvůli opotřebování pneumatik začnou držet na jejich povrchu černé barevné gumové částěčky. Ve výsledku dává betonový povrch vozovky podobný druh odrazu jako asfalt (Hazarika et al., 1999). To platí i pro infračervený laser, jak dokládá výsledek klasifikace (Song et al., 2002). V odrazivosti je spektrální vlastnost asfaltových silnic výrazně odlišná od vegetace a většiny stavebních materiálů. Míra odrazivosti asfaltu s kamínky je 17 % pro infračervený laser, zatímco beton má míru odrazivosti mezi 25 a 35 %. Ostatní významné materiály nemají míru odrazivosti podobnou asfaltovému povrchu.

Ředitelství silnic a dálnic České republiky ve svých přehledech z informačního systému o silniční a dálniční síti ČR (2013) uvádí tyto kryty vozovky – neprašný, šterkový a bez určení. Do kategorie neprašných materiálů patří těžký, živičný střední a lehký kryt. Těžký kryt se dále dělí na dlážděný, betonový a živičný těžký povrch a do skupiny lehkých materiálů náleží živičný lehký a válcovaný náhradní. Živičným povrchem je myšlen asfalt, který je přírodním naftobitumenem černé barvy, silně viskózní až tvrdý. Asfalt se výjimečně vyskytuje volně v přírodě, ale obvykle je reziduem ropného ložiska, z něhož se odpařily lehčí frakce (Geologická encyklopedie, 2013). Z uvedených podkladů vyplývá, že nejvíce se pro stavbu silniční sítě využívá živičného středního krytu. Na druhém místě je kategorie těžkého krytu jako celek a z ní je největším podílem zastoupen opět živičný povrch, konkrétně těžký. I živičný povrch lehký má větší zastoupení než betonový povrch.

Ve městech tedy dochází k detekci více prvků, většinu z nich je možné eliminovat pomocí definování maximální přijatelné šířky komunikace, dle literatury je tato šířka u dálnic většinou nastavena na 10 m a u silnic je menší, stanovena individuálně dle testované lokality. Díky tomu nebudou klasifikovány velké budovy a parkoviště. Malá parkovací stání okolo komunikací a dvorky uvnitř bloku budov zůstanou po této podmínce zachovány. Problematika objektů na vozovkách se týká nejčastěji dálnic, kde dochází k silnému rozptylu vlivem dopravních značek, mostů a ostatních kovových objektů. Díky tomu je tato kategorie nejvíce neúplná – obsahuje hodně pixelů, které nepatří do kategorie silnic.

2.5 Klasifikace dat

Klasifikace rozděluje naměřený datový soubor (obraz) do tříd charakterizovaných svými druhovými a stavovými parametry. V praxi pracujeme nejčastěji s tzv. obrácenou úlohou DPZ – na základě naměřených (radiometrických) hodnot se snažíme získat nějakou informaci o vlastnostech snímaného povrchu. Naším cílem je v podstatě stanovit podobu tzv. přenosové funkce – funkčního vztahu mezi naměřenými radiometrickými hodnotami a parametry snímaného objektu (Kolář, 1997). Na základě znalosti tohoto vztahu pak můžeme různé typy zemského povrchu rozřazovat do tříd právě podle podobnosti těchto parametrů. Tento proces je nazýván klasifikací.

Při klasifikaci je nejprve nezbytné nalézt tzv. klasifikační pravidla, podle nichž bude rozdělení do jednotlivých tříd provedeno. Při sestavování klasifikačních pravidel vycházíme z příznaků, které představují typické projevy chování dané třídy objektů. Sledujeme tedy, jak se mění naměřená radiometrická hodnota v závislosti na změně druhových a stavových parametrů objektu (Kolář, 1997). Příznaky můžeme dle Koláře (1997) dělit do několika skupin:

- a) *spektrální příznaky*: vyjadřují odrazivé a vyzařovací vlastnosti zkoumaného povrchu, jako jsou normalizované hodnoty intenzity záření získané v jednotlivých spektrálních intervalech, jejich lineární kombinace nebo celková intenzita ve všech kanálech

- b) *prostorové příznaky*: souvisí se změnou souřadnic X a Y – jedná se tedy např. o typická sousedství a topologické vazby, důležitým prostorovým příznakem jsou i parametry vyjadřující vnitřní texturu objektu
- c) *časové příznaky*: sledují změnu vlastností povrchu (prostorové a spektrální příznaky) v čase, je třeba odlišit výskyt změn náhodných od sledovaných změn

Vlastní rozdělení obrazu do tříd může být provedeno dvěma způsoby. Prvním z nich je klasifikace, kde je rozdělení do tříd uskutečněno pomocí počítačového algoritmu. Pixel je zařazen do třídy podle předem definovaných pravidel. Druhým způsobem je interpretace, kde je rozdělení do tříd provedeno na základě vizuálního sledování obrazu a také na základě vlastních zkušeností. Oba přístupy mají své klady i zápory. Klasifikace je rychlejší, dokáže zpracovat i detaily, které při vizuální interpretaci mohou být sotva postřehnuty. Naopak klasifikace nedokáže vzít v úvahu i jiné parametry, jako je např. sousedství jednotlivých tříd a barvy a tvary objektů. Při interpretaci jsou brány v úvahu především tyto skutečnosti a právě proto je časově náročnější, ale také přesnější. V případě velkých snímků je v praxi nepoužitelná. Ani přes výše uvedené není možné říci, který postup je lepší.

Klasifikaci prostorových dat je možné podle metody rozdělit na pixelovou (klasifikační pravidlo aplikujeme na každý pixel zvlášť bez ohledu na hodnoty sousedních pixelů obrazu) a objektovou (z pixelů jsou nejprve vytvořeny objekty (tj. určité skupiny pixelů), které jsou pak přiřazovány k jednotlivým třídám jako celek). Klasifikaci je možné také dělit na řízenou a neřízenou. U řízené klasifikace jsou třídy, do nichž chceme obraz rozdělit předem definovány – přiřazení jednotlivých pixelů je pak provedeno na základě vybraných reprezentativních vzorků (trénovací množiny) jednotlivých tříd. V případě neřízené klasifikace je obraz roztržiděn na shluky navzájem si podobných pixelů, kterým je následně člověkem přiřazen věcný význam. V této práci se bude jednat především o objektovou klasifikaci, jelikož při práci s objekty, vytvořenými segmentací, je možné použít více příznaků a tím lépe detekovat silniční síť v obraze. V souhrnu, objektově orientovaná analýza obrazu kombinuje funkčnost GIS a technik dálkového průzkumu Země tím, že pracuje s polygony, homogenními shluky místo s jednotlivými pixely (Horňáková, 2011).

2.5.1 Objektově orientovaná klasifikace

Jak již bylo řečeno, objektová klasifikace pracuje s objekty (skupina prostorově souvisejících pixelů s podobnými vlastnostmi), které před začátkem klasifikace určíme na základě vizuální interpretace. Tyto skupiny pixelů (segmenty) představují objekty reálného světa nebo jejich části (Walter, 2004). Segmenty jsou polygony tvořené sousedními pixely s relativně homogenními spektrálními charakteristikami.

Výhodou objektové klasifikace je především to, že kromě spektrálních příznaků můžeme pracovat i s texturami, vzájemnými polohovými vztahy nebo s geometrickými charakteristikami jednotlivých objektů. Nevýhodou je především to, že objektová klasifikace je programově o mnoho složitější a i při její aplikaci je do ní nutné často zasahovat – není zcela automatická.

Objektová klasifikace má hierarchický charakter – objekty jsou tvořeny na více úrovních. Platí zde ale pravidlo, že objekt na vyšší úrovni se musí skládat z celého počtu objektů nižší úrovně (GISAT, 2013).

Objektově orientovaná klasifikace pracuje s objektovými příznaky, které jsou obvykle členěny do několika skupin:

- a) *primární příznaky*: průměrná hodnota odrazivosti v daném spektrálním kanálu pro daný objekt
- b) *sekundární příznaky*: odvozeny z příznaků primárních – např. různé poměry kanálů, indexy apod.
- c) *tvarové příznaky*: geometrické charakteristiky objektů – například vyhledávání liniových objektů pomocí výpočtu poměru délka/šířka objektu, kulatost objektu apod.
- d) *texturální příznaky*: výpočet tzv. texturální míry – směrodatné odchylky jednotlivých odstínů. Zkoumá se, jak často se v určitém směru vyskytuje daná kombinace odstínů (Haralick). Početně velmi náročné.

Při objektové klasifikaci se setkáváme také s pojmem relační příznaky, které zkoumají vzájemné prostorové vztahy mezi objekty (např. sousedství) a vztahy objektů mezi jednotlivými úrovněmi segmentace.

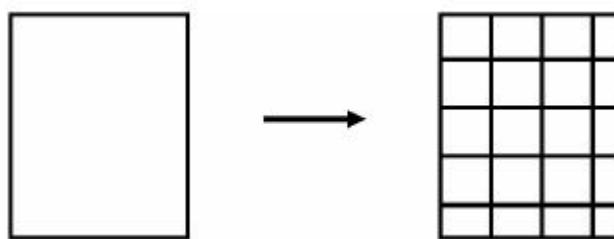
Fuzzy klasifikace patří mezi tzv. měkké klasifikátory a umožňuje vyjádřit neurčitost zařazení segmentu do třídy. Každá třída je popsána pomocí fuzzy výrazů, které jsou určeny na základě trénovacích ploch, a vyjadřují podmínky, za kterých je objekt zařazen do dané třídy. Fuzzy klasifikace by se měla používat v případech, že neexistuje přesná hranice mezi třídami, což v případě reálných dat nastává velmi často (Bromová, 2012). Podle Benz et al. (2004) totiž vede použití prahových hodnot k idealizaci reálného světa a způsobuje problémy při klasifikaci. Fuzzy logická klasifikace počítá s určitou mírou nejistoty v přiřazení k dané třídě, které je omezeno určitými prahy. Bez fuzzy logiky budou všechny hodnoty mezi těmito prahy (tj. mezi jakousi minimální a maximální přípustnou hodnotou) přiřazeny k dané třídě. Při zavedení fuzzy logiky zavádíme ještě funkci pravděpodobnosti. Př.: víme, že do dané třídy patří objekty s hodnotou mezi P1-P2, ale zároveň také víme, že čím víc se hodnota blíží P2, tím je pravděpodobnost, že objekt k dané třídě patří, nižší. Tato informace může být definována fuzzy funkcí. Fuzzy pravidla lze kombinovat pomocí logických operátorů AND, OR nebo XOR (Dobrovolný, 1998).

Opakem fuzzy klasifikace je metoda rozhodovacího stromu, která patří mezi tzv. tvrdé klasifikace. Klasifikace probíhá na základě určování prahových hodnot, kdy jsou na začátku data rozdělena do homogenních skupin podle toho, zda splňují danou podmínku nebo ne. Vzniklé skupiny se můžou dále dělit podle dalších podmínek. Výhodou této klasifikace je nezávislost na rozložení dat a rychlost zpracování.

Obecný postup objektové klasifikace se skládá z několika kroků. Prvním z nich je segmentace, která dělí obrazová data v geografickém a příznakovém prostoru do oddělených regionů, shluků pixelů, o definované míře homogenity/heterogenity a určité velikosti. Segmentační algoritmy můžeme podle přístupu ke klasifikaci snímku rozdělit do dvou skupin. První skupinou algoritmů je „Top – down“ přístup, který velké části dělí na menší části. Tyto algoritmy vezmou celý snímek a začnou ho dělit na menší části, tím dochází ke zvýšení míry homogenity. V okamžiku, kdy je dosaženo minimální hodnoty, je dělení zastaveno. Opakem je skupina algoritmů „Bottom – up“, která spojuje malé části do větších. V praxi to znamená, že se začne u jednoho pixelu, ke kterému jsou přidávány další, a kontroluje se opět míra homogenity. V okamžiku, kdy míra homogenity klesne pod určitou hranici, tak segmentace končí.

Do skupiny „Top – down“ patří Chessboard segmentation, Quad tree – based segmentation, Contrast filter segmentation a Contrast split segmentation. Mezi segmentační algoritmy skupiny „Bottom – up“ patří Multiresolution segmentation (multimeřítková segmentace), Multi – threshold segmentation a Spectral difference segmentation. (eCognition Guide, 2012)

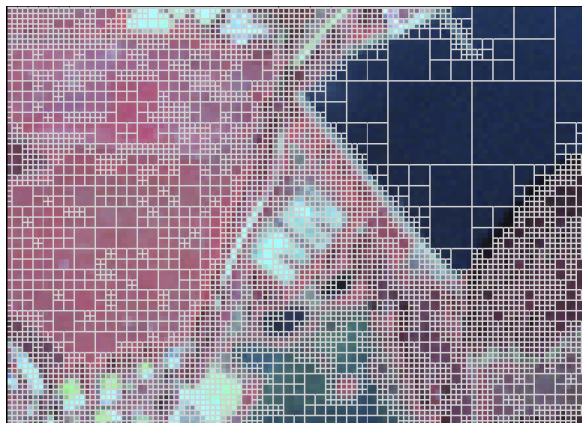
Z obou skupin segmentačních algoritmů budou níže popsány ty nejpoužívanější. První z nich je Chessboard segmentation, který představuje jeden z nejjednodušších segmentačních algoritmů. Dělí scénu na síť pravidelných čtverců o stejné velikosti (obr. 1). Často je využíván pro rozdělení obrazu, kdy relativně malé obrazové objekty již byly identifikovány, ale mohou být dále segmentovány s použitím malého čtvercového parametru (square – size parameter) pro získání podrobnější analýzy (Hornáková, 2011). Naopak při aplikaci tohoto algoritmu na velké plochy dochází k vytváření silně nehomogenních objektů, protože velikost čtverce je úměrná celému obrazu a velký čtverec tak může obsahovat více typů povrchů.



Obr. 1 Chessboard segmentation (Zdroj: eCognition Guide, 2012)

Quad tree segmentation je podobná předchozímu klasifikačnímu přístupu, jelikož také dělí obraz do čtverců, ale v tomto případě mají různou velikost. Je možné definovat horní hranici barevných rozdílů v rámci každého čtverce pomocí „Scale parameter“. Po vytvoření čtvercové sítě pokračuje algoritmus tak, že pokud není splněno kritérium homogenity (např. maximální barevný rozdíl uvnitř čtverce je větší než definovaná váhová hodnota), dochází k dalšímu rozdělení čtverce na další 4 menší čtverce. Tento proces se opakuje do té doby, dokud není splněno kritérium homogenity pro každý čtverec. U Quad tree segmentace obvykle velmi

homogenní oblasti produkují větší čtverce než heterogenní oblasti. V porovnání s multimeřítkovou segmentací je tento segmentační algoritmus méně náročný na zdroje. Objekty vzniklé Quad tree segmentation jsou sice homogenní, ale tvarově jsou velmi nepřírozené, což je vidět na obr. 2, konkrétně na oblasti vodní plochy.



Obr. 2 Quad tree segmentation (Zdroj: přednáška ZTI - OBIA, 2010)

Posledním segmentačním algoritmem, který bude blíže představen, je Multiresolution segmentation – Region Growing (obr. 3). Tento algoritmus se snaží dosáhnout kompromisu mezi spektrální a tvarovou homogenitou – před zahájením segmentace se vždy nastavují váhy spektrální a tvarové homogenity. Uživatel si určí, zda víc záleží na přirozenosti tvarů objektů nebo na jejich spektrální homogenitě. Jedná se tedy o semi – automatický proces, kdy uživatel definuje specifické parametry, které ovlivňují velikost a tvar výsledných segmentů v obraze. Výsledné objekty jsou přiřazeny nejen podle spektrálních charakteristik, ale i podle tvaru, texturálních parametrů, kontextuálních informací či vztahu k sousedním objektům. Segmentační technika u „Region growing algorithm“ začíná v každém bodě obrazu s jedním pixelovým objektem a slučuje tyto objekty v obraze do větších (eCognition Guide, 2012).



Obr. 3 Multimeřítková segmentace obrazu (Zdroj: přednáška ZTI – OBIA, 2010)

Významným kritériem multimeřítkové segmentace je velikost objektů („scale parameter“ – průměrná velikost objektů), jeho výběr závisí na účelu klasifikace. Kromě toho musí být nastaveny hodnoty pro barvu („color“ – průměrná spektrální hodnota), tvar („shape“ – geometrická forma objektů), kompaktnost („compactness“) a hladkost („smoothness“). Zatímco „scale parameter“ určuje průměrnou velikost generovaných objektů, „color“ a „shape“ vyjadřují příslušná kritéria homogenity, která jsou aplikována na daný snímek. (eCognition Guide, 2012)

Poté, co je provedeno testování homogenity jednotlivých segmentů a na základě účelu je vytvořeno klasifikační schéma (volba klasifikační metody), je možné provést samotnou klasifikaci segmentů (objektů).

2.6 ZABAGED

Výsledky klasifikace budou porovnány s daty existující geografické databáze – ZABAGED a na základě jejich srovnání bude provedeno hodnocení. Základní bází geografických dat je geografickým modelem území České republiky, který svou přesností a podrobností zobrazení geografické reality odpovídá přesnosti a podrobnosti Základní mapy České republiky v měřítku 1: 10 000 (ZM 10). ZABAGED je tvořen 106 typy geografických objektů zobrazených v databázi vektorovým polohopisem a příslušnými popisnými a kvalitativními atributy. Z této databáze můžeme získat informace o sídlech, komunikacích, rozvodných sítích a produktovodech, vodstvu, územních jednotkách a chráněných územích, vegetaci a povrchu a prvcích terénního reliéfu. Součástí ZABAGED jsou i vybrané údaje o geodetických, výškových a tíhových bodech na území České republiky a výškopis reprezentovaný prostorovým 3D souborem vrstevnic (ČÚZK, 2012).

ZABAGED spravuje Český úřad zeměměřičský a katastrální, který začal v roce 1995 s vektorovou digitalizací tiskových podkladů ZM 10, která byla s výjimkou zástavby sídel dokončena v roce 2001. Od této doby probíhá celoplošná aktualizace, na kterou v roce 2005 navazuje nová technologie aktualizace a správy. Je také vytvořena centrální databáze, která je aktualizována online z detašovaných teritoriálních pracovišť Zeměměřičského úřadu. Aktualizace bude nadále probíhat, ale nově vždy pro jednu třetinu území České republiky na základě aktuálních leteckých snímků a barevných ortofot. Aktualizace jedné třetiny trvá tři roky, takže celá Česká republika bude aktuální vždy po devíti letech. (ČÚZK, 2012)

Výsledky klasifikace budou porovnány s katalogem objektů ZABAGED, který je tvořen 123 základními typy geografických objektů, členěných do osmi tematických kategorií, a více než 350 typy popisných atributů. Kategorie, která bude nosná pro tuto práci, je kategorie „komunikace“. Obsahuje celkem 34 typů objektů, ale zdaleka ne všechny budou použity pro porovnání výsledků. Budou využity především informace o silnicích, dálnicích a uliční síti. Všechny tyto typy mají definovanou geometrickou přesnost na úrovni B, která je přiřazena objektům, jejichž poloha je v území jednoznačně určitelná (např. budovy, komunikace) a střední polohová chyba dosahuje hodnoty do 5 metrů.

Silnice a dálnice jsou určeny linií, která představuje osu silnice (dálnice) o dané šířce. Ulice je pozemní komunikace v sídelním útvaru bez ohledu na její šíři. Stejně jako silnice a dálnice je určena osou, v tomto případě se jedná tedy o osu ulice. S ostatními typy objektů kategorie „komunikace“ nebude pracováno.

3 Lokalita

Poznatky získané z literatury budou aplikovány na oblasti ve Středočeském kraji. Bude vytvořena klasifikační báze nad obcí Jirny (okres Praha – východ) a poté bude otestována nad lokalitou obce Modletice (Praha – východ). Obec Jirny (obr. 4) má výměru 824 ha a nachází se asi 23 km východně od centra Prahy. Skládá se ze dvou částí – Jirny a Nové Jirny, které jsou od sebe vzdáleny cca 1,5 km. Zájmová oblast má charakter příměstské krajiny, nejedná se tedy o čistě městskou a ani o čistě vesnickou krajinu, ale o jejich přechod a díky tomu je testované území velmi rozmanité. Jsou zde zastoupeny jak lesy, vodní plochy a pole, tak řídká i hustá zástavba a průmyslové komplexy. To znamená, že půdní pokryv je z hlediska segmentace poměrně členitý a je reprezentován jak velkými homogenními celky, tak i velmi malými objekty. A právě pro účely klasifikace takového typu půdního pokryvu jsou snímky pořízené senzorem QuickBird ideální, jelikož na nich lze poměrně snadno (vizuálně) odlišit od sebe jednotlivé typy objektů (Petr, 2012). Zemědělské oblasti se nacházejí především mezi oběma částmi obce, z jihu obklopuje obec Jirny Klánovický les a na severu území se nacházejí komerční oblasti – velkokapacitní sklady a překladiště firem.

Z hlediska dopravní dostupnosti má obec ideální polohu, nejen že leží v blízkosti dálnice D11, která spojuje Prahu s Hradcem Králové, ale územím obce také procházejí silnice II. třídy č. 101 a 611. Dálnice D11 se v České republice buduje již od roku 1978, kdy byla zahájena stavba úseku Praha – Jirny v celkové délce 8,3 km a šířce 34 m, jelikož se počítá s budoucím zkapacitněním na 2 x 3 pruhy (v současné době se jedná o čtyřproudovou dálnici). Ředitelství silnic a dálnic České republiky ve svých publikacích uvádí šířku komunikací, ale ve skutečnosti se jedná o celkovou šířku komunikace, která se skládá kromě šířky všech jízdních pruhů, také ze středního dělicího pásu, vodících proužků a zpevněné a nezpevněné krajnice. Úsek Jirny – Třebestovice, který navazuje na první úsek, měří 18,4 km, ale na území obce Jirny se nachází pouze svou malou částí. Zajímavostí je, že je užší než první úsek a to o 7,5 metru. Změna šířky přichází za sjezdem u osmého kilometru dálnice ve směru od Prahy, na území obce Jirny se tedy nachází necelý kilometr „užší“ dálnice D11. Skutečná šířka jízdních pruhů úseku Praha - Jirny dálnice D11 je 11 m a prostor mezi nimi, vyplněný vegetací, činí 12 m. Povrch vozovky je cementobetonový. (ŘSD, 2008)

Silnice 101 je aglomeračním okruhem, který slouží k objíždění Prahy a ke spojení okolních hlavních silnic. Silnice prochází např. přes Zbraslav (městská část Prahy), Říčany, Úvaly, Jirny, Brandýs nad Labem, Neratovice, Kralupy nad Vltavou, Kladno a Unhošť. Jedná se o silnici druhé třídy, která je 9,5 metru široká (ŘSD, 2012). Silnice 611 vede paralelně s dálnicí D11, jedná se tedy o doprovodnou komunikaci a slouží pro vozidla bez oprávnění pro silnice pro motorová

vozidla. Má parametry státní silnice, jelikož je to bývalý úsek silnice I/11, a která po dostavbě dálnice D11 spojuje Hradec Králové, Šumperk, Opavu a Ostravu. Nepodařilo se nalézt přesnou šířku komunikace, která byla stanovena při výstavbě, ale z leteckých snímků vyplývá, že běžná šířka komunikace se pohybuje okolo 8 metrů. Ostatní komunikace, které procházejí územím obce, jsou nižšího řádu, a proto o nich nejsou evidovány žádné bližší informace.

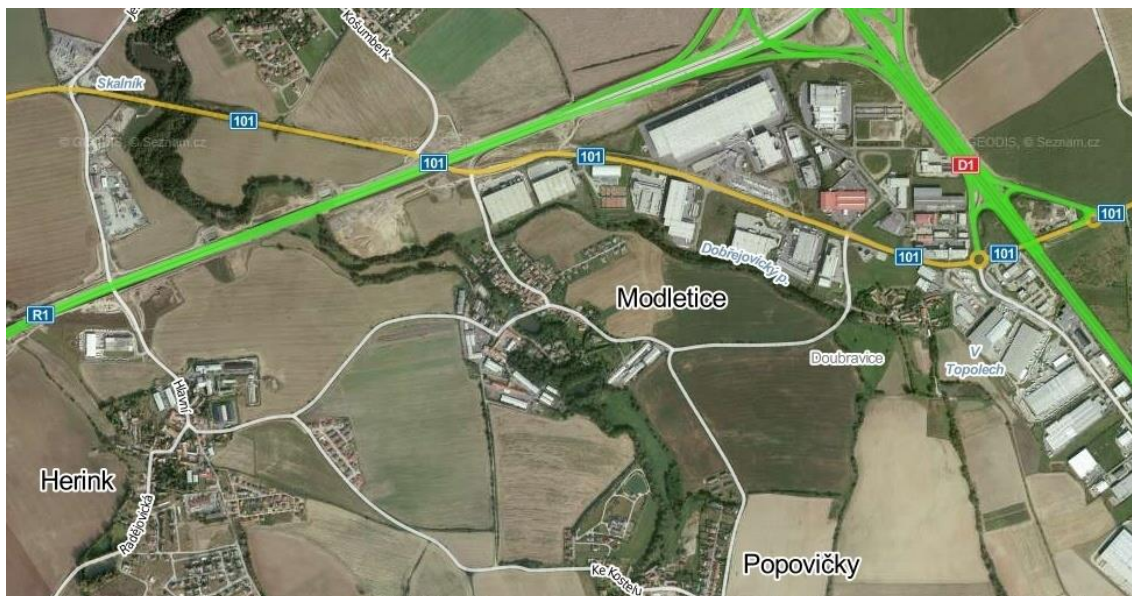


Obr. 4 Lokalita obce Jirny (Zdroj: www.mapy.cz)

Ověření přenositelnosti klasifikační báze bude provedeno nad obcí Modletice (obr. 5) v okrese Praha – východ. Obec Modletice se nachází 20 km jihovýchodně od Prahy a má rozlohu 344 ha. K obci patří základní sídelní jednotka Doubravice. Obec má podobný charakter území jako obec Jirny – jedná se také o příměstskou lokalitu, jediným výraznějším rozdílem je menší podíl lesního porostu. Severní částí obce protéká Dobřejovický potok, v obci se dále nacházejí dva větší rybníky, které jsou spojeny menším potokem, a na jih od obce se nachází třetí rybník. Celkově jde zde více vodních ploch než v první lokalitě. Stejně jako v případě obce Jirny se zde nachází velká logistická centra, která jsou umístěna v blízkosti dopravních tepen, jelikož ze severu a z východu obklopuje obec rychlostní silnice R1 (součást pražského okruhu) a dálnice D1.

Dálnice D1 je nejdelší a také nejstarší dálniční tah v České republice, spojuje Prahu, Brno a Ostravu. Dálnice D1 je také součástí několika evropských silnic, např. E50, E55, E65, které spojují Evropu od severu k jihu a od západu na východ. První úsek dálnice D1 mezi Prahou a Mirošovicemi byl otevřen v roce 1971. V 90. letech 20. století došlo k úpravě prvního úseku z důvodu velké vytíženosti z původních čtyř pruhů na současných šest pruhů. Součástí prvního úseku byla i výstavba části dálnice mezi Čestlicemi a Mirošovicemi (celkem 13,056 km), která zahrnuje i mimoúrovňovou křižovatku, která se nachází severovýchodně od obce Modletice. Tento úsek byl stavěn v kategorii D28/120, což znamená, že dálnice má šířku 28 metrů a její

konstrukční rychlost je 120 km/h. V polovině devadesátých let byla rozšířena na 2 x 3 pruhy (kategorie D34/120 a D32,5/120). (ŘSD, 2013)



Obr. 5 Lokalita obce Modletice (Zdroj: www.mapy.cz)

Rychlostní silnice R1 je součástí pražského okruhu, v blízkosti obce Modletice se nachází jeho jihovýchodní část. Po dobudování vytvoří vnější obchvat Prahy, který bude spojoval většinu dálnic a rychlostních silnic v České republice. Úsek rychlostní silnice, který se nachází v okolí obce Modletice, byl zprovozněn v roce 2010. Rychlostní silnice je konstruována jako čtyřpruh s konstrukční šířkou 27,5 m a maximální povolenou rychlostí 100 km/h se středním rozšířeným pásem na čtyři metry, to je s volnou šířkou 28 m (ŘSD, 2013). Vzhledem k termínu dostavby rychlostní silnice není možné ji vidět na družicovém snímku a chybí zde i velká mimoúrovňová křižovatka, která ji spojuje s dálnicí D1. Obcí dále prochází silnice č. 101, která je aglomeračním okruhem a podrobnosti jsou popsány výše, jelikož vede také v blízkosti obce Jirny. Ostatní komunikace, které procházejí obcí, nemají označení a nejsou o nich evidovány žádné informace. Obě lokality jsou si velmi podobné svým charakterem a je možné předpokládat, že vytvoření klasifikační báze nad jedním územím by mohlo dávat dobré výsledky nad územím druhým.

4 Použitá data a software

4.1 Družicová data

V této práci budou použity snímky z družice QuickBird, které byly pořízeny v dubnu v roce 2007. Pro oblast obce Jirny konkrétně dne 21. 4. 2007 v 10 hodin a 25 minut a pro lokalitu obce Modletice dne 13. 4. 2007 v 10 hodin a 35 minut. Družicová data z družice QuickBird pro oblast obce Jirny a Modletice jsou k dispozici, jak multispektrální s prostorovým rozlišením 2,4 m, tak panchromatická s prostorovým rozlišením 0,6 m. Data jsou v souřadném systému WGS 84/UTM 33 Northern Hemisphere, Transverse Mercator.

4.2 Data ALS

K dispozici jsou klasifikovaná data leteckého laserového skenování ve formátu .xyz v souřadném systému S-JTSK Krovak EastNorth, která vznikla v rámci snímání České republiky Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním. Data byla získána v rámci vytváření nového digitálního modelu reliéfu. Klasifikovaná data jsou rozdělena do kategorií: budovy, vegetace, povrch, výškové překážky, fill void (pravidelná mřížka 5x5 m, kterou doplní SCOP v místech, kde mu chybí LLS data), error a body na mostovkách. Třída výškových překážek obsahuje body ve výšce 46 m nad terénem, body s označením error jsou body pod terénem, případně dna příkopů nebo terén pod stromy, kde došlo k chybné klasifikaci. Data mají uvedenou bodovou hustotu mezi 1,5 až 2 body na m², program ArcGIS ji pomocí funkce PointFileInformation spočetl na 1,62 bodu na m². Snímání nad obcí Jirny a Modletice proběhlo v roce 2010.

4.3 Software

Zpracování dat probíhalo v softwarech ArcGIS 10.1, eCognition Developer Trial 8.8, eCognition Developer 8.7.2 a PCI Geomatica 10.1.2. Pansharpening družicového snímku byl realizován v softwaru PCI Geomatica v modulu Focus. Transformace souřadného systému družicových snímků proběhla v softwaru ArcGIS, stejně tak načtení a spojení dat leteckého laserového skenování. V eCognition Trial version probíhalo testování a tvorba klasifikační báze a nastavení parametrů segmentačních úrovní. Samotná aplikace klasifikační báze, segmentace a následná objektová klasifikace byly provedeny v softwaru eCognition Developer.

5 Metodika

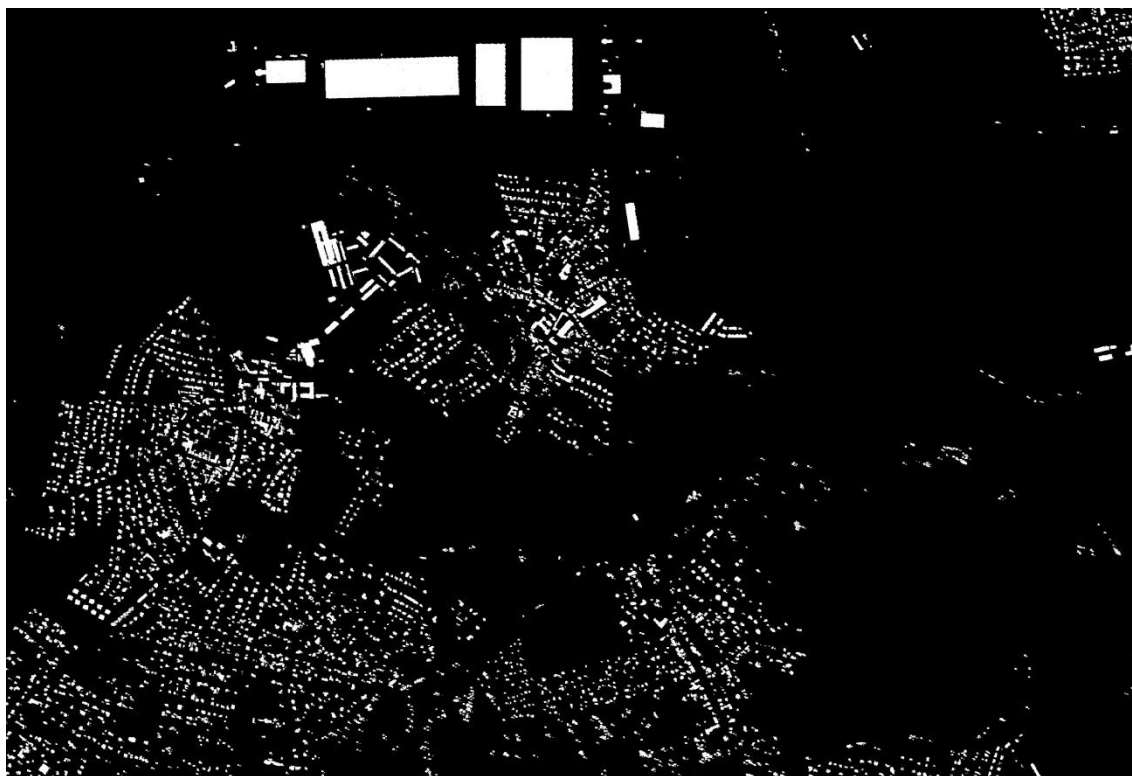
Plně automatický postup, jak získat silniční síť z dat ALS a družicových dat s velmi vysokým rozlišením, neexistuje. Z uvedených dat bude cílem získat jednotlivé komunikace, které jsou sice součástí terénu, ale mají specifický charakter. Jedná se vždy o plochy, které nemají žádné strmé změny výšek, ba naopak stoupání a klesání je velmi pozvolné. Navíc povrch komunikace je vždy téměř rovný a hladký. (Dolanský, 2004)

Před samotnou klasifikací silniční sítě je nutné provést několik kroků, které povedou k téměř automatické detekci komunikací. Jednotlivé kroky jsou podrobně popsány níže. V literatuře je uvedeno mnoho příznaků, které vedou ke kvalitní klasifikaci silnic ve snímcích, ale autoři zároveň dodávají, že jsou platné právě nad daným územím. Většina z nich přenositelnost klasifikační báze netestovala, a proto budou uvedené příznaky brány jako doporučení a bude snaha o nalezení takových příznaků, které budou aplikovatelné i na jiné území. S detekcí silniční sítě souvisí mnoho problémů, které jsou popsány výše. Jedním z nich je podobnost použitých materiálů. Vzhledem k tomu, že jsou k dispozici také data z leteckého laserového skenování, tak bude využita možnost zkombinování informací z obou typů dat. V tomto případě bude použita informace o výšce jednotlivých budov, které tvoří samostatnou vrstvu a na jejím základě dojde k eliminaci alespoň části konfliktních oblastí. Další přínosnou vrstvou bude kategorie vegetace z dat leteckého laserového skenování, která by měla pomoci

se správnou detekcí jednotlivých vegetačních typů krajinného pokryvu. Co se týká samotných příznaků pro správné určení komunikací, tak by přínosnými mohli být např. šířka, poměr šířka/délka, vlastnosti odrazivosti použitých materiálů v jednotlivých pásmech, informace o výšce jednotlivých objektů. Spojení obou typů dat by mělo přinést především zlepšení výsledků klasifikace oproti použití pouze jednoho typu dat.

5.1 Zpracování dat z leteckého laserového skenování

Klasifikovaná data leteckého laserového skenování jsou ve formátu .xyz v souřadném systému S-JTSK Krovak EastNorth. Vzhledem k tomu, že data vznikla v rámci kampaně snímání digitálního modelu reliéfu, tak jsou rozdělena podle mapových listů státní mapy 1 : 5 000 (SM5), která mají velikost 2,5 x 2 m. Data byla uložena do formátu .txt a došlo k označení sloupců pro snadnější orientaci. ArcCatalog nabízí funkci Create feature class from XY table, která data obsažená v tabulce (informace o poloze a výšce) převede na bodovou vrstvu ve formátu shapefile. Jednotlivé mapové listy byly spojeny do jedné vrstvy pomocí funkce Merge. Pro účely této práce budou využity pouze vrstvy budov (obr. 6) a vegetace (obr. 7). Obě bodové vrstvy byly převedeny pomocí funkce Point to raster na rastrové objekty. Velikost rastru vychází z hustoty původního bodového mračka a je nastavena na 1,65. Obě třídy byly uloženy do formátu .tif a načteny do programu eCognition jako pomocné vrstvy. Vrstva budov obsahuje i některé body, které po vizuální stránce neodpovídají budovám na družicovém snímku. K jejich eliminaci dojde až během klasifikace obrazu, protože odstranění těchto bodů pomocí výšky není možné, jelikož nepředstavují osamocené hodnoty, ale jsou velmi podobné ostatním bodům, které budovami jsou.



Obr. 6 Vrstva budov z leteckého laserového skenování – Jirny



Obr. 7 Vrstva vegetace z leteckého laserového skenování - Jirny

5.2 Zpracování družicových dat

Družicové snímky vyžadují ve většině případů úpravu před samotnou objektově orientovanou klasifikací. V případě dat s velmi vysokým rozlišením se jedná se o tzv. pansharpening (image fusion). Je to technika digitálního spojení obrazových dat, která kombinuje panchromatická (černobílá) data s vyšším prostorovým rozlišením a multispektrální (barevná) data s prostorovým rozlišením nižším. Výsledným produktem jsou multispektrální data s rozlišením odpovídajícím původnímu rozlišení dat panchromatických. V případě družice QuickBird je prostorové rozlišení panchromatických dat zhruba 4x vyšší než u dat multispektrálních. Použití metody pan-sharpening je tedy přirozenou cestou spojení obou typů dat vedoucí k získání barevného produktu s maximální podrobností. (GISAT, 2013)

Prostorové rozlišení snímků je klíčové pro detekci komunikací. Snímky s vysokým rozlišením nabízejí velmi podrobné informace o objektech, jako je např. spektrální příznak, textura, tvar a mohou tedy velmi dobře doplnit informace z lidarových dat. Při analýze prostorového rozlišení snímků založené na studiu spektrálního chování jednoho obrazového prvku je možné vysledovat jednoduchý trend. Ukázalo se, že s rostoucím prostorovým rozlišením snímků se redukují problémy se smíšenými pixely. Na druhou stranu se však začínají vyskytovat obtíže spojené s vysokou variabilitou pixelů uvnitř jednotlivých tříd a také s rostoucím vlivem šumu na výsledky klasifikace (Schiewe, Tufte, Ehlers 2001). Pro samotnou extrakci komunikací platí, že jsou - li k dispozici snímky s prostorovým rozlišením větším než 2 m, můžeme silnice považovat za protáhlé regiony, nikoli za liniové prvky (Janatová, 2006). Zhruba od tohoto rozlišení mohou také extrakci silnic znesnadňovat objekty a jevy, jako je vodorovné dopravní značení, automobily, osoby, chodníky, stíny budov, různorodost silničních povrchů apod. Vliv jmenovaných objektů a jevů na extrakci se s rostoucím rozlišením snímků zvětšuje (Doucette et al., 2001).

Naopak ve snímcích s menším prostorovým rozlišením, zhruba od velikosti pixelu 2 m, se silnice ve snímcích objevují jako linie, které tvoří různě hustou síť. Linie reprezentující středové osy silnic mohou být v tomto rozlišení relativně snadno extrahovány a to i v případě, že v době snímkování byly na povrchu silnice přítomny objekty, které znesnadňují extrakci u snímků s větším rozlišením. Se zmenšujícím se měřítkem snímků klesá vliv substruktur objektů. Tento jev je označován jako abstrakce: např. objekt silnice je zjednodušen – abstrahován a jeho základní charakteristiky jsou zdůrazněny na úkor potlačených méně podstatných vlastností objektu. (Hinz, Baumgartner, Steger 2000)

Co se týká spektrálního rozlišení snímků, pro odlišení objektů vytvořených člověkem od ploch s vegetačním krytem je vhodné používat snímky, které obsahují informace z červené a infračervené části spektra. Princip odlišení zelených ploch od jiných objektů je v literatuře vysvětlen následujícím způsobem. Viditelné záření je rostlinami velkou měrou absorbováno a zčásti jimi projde. Odražené záření je tedy velmi málo intenzivní. Naopak v oblasti blízkého infračerveného záření je spektrální charakteristika zelených částí rostlin určována hlavně velmi nízkou pohltivostí buněk. Stavební látkou je celulóza, jejíž odrazivost se pohybuje okolo 6 %.

Skutečná odrazivost v blízkém infračerveném oboru spektra je ale mnohem vyšší, což je způsobeno několikanásobným odrazem uvnitř listu rostliny. Prudký nárůst odrazivosti z absorpčního pásu v červené barvě do oblasti vysoké odrazivosti je pro vegetaci zcela typický. Proto se používá rozdíl odrazivostí naměřených v těchto dvou oblastech jako indikátoru přítomnosti zelené hmoty. (Kolář, Halounová, Pavelka 1997)

Postup předzpracování družicových dat je stejný pro obě lokality, ale podrobněji bude popsán na oblasti obce Jirny, jelikož nad ní vznikala klasifikační báze, která bude otestována nad lokalitou obce Modletice. V programu Geomatica, modul Focus je k dispozici algoritmus pansharpening, který po spojení multispektrálních a panchromatických dat, vytvoří zaostřený multispektrální snímek s prostorovým rozlišením panchromatického snímku, který je z důvodů prostorového rozlišení 0,6 m vhodnější pro následnou klasifikaci. Získaný snímek je z hlediska výpočetní náročnosti příliš velký a pokrývá velkou oblast, která odpovídá velmi širokému okolí obce Jirny. Ze snímku bylo vybráno území o velikosti 4620 x 3150 m (viz obr. 8), které odpovídá okolí obce Jirny, pomocí funkce Clipping/Subsetting v programu PCI Geomatica. Snímek je v souřadném systému WGS 84/UTM 33 Northern Hemisphere, Transverse Mercator, zatímco data z leteckého laserového skenování jsou v souřadném systému S-JTSK Krovak East North. Je tedy nutné provést transformaci družicového snímku. Snímek ve formátu .pix byl načten k datům ALS do programu ArcGIS, kde byla v hned v úvodu nabídnuta transformace souřadného systému. Byla zvolena transformace GCS_S_JTSK a snímek byl uložen do formátu .tif, jelikož program ArcGIS s formátem .pix nepracuje. Poté byl pomocí nástroje Batch define coordinate system definován správný souřadný systém. Pro kontrolu byla nad družicovými daty zobrazena bodová vrstva dat leteckého laserového skenování a vzhledem k tomu, že průmyslová oblast se překrývala a i ostatní výraznější objekty si odpovídaly, byl snímek uložen.



Obr. 8 Výřez z družicového snímku nad obcí Jirny

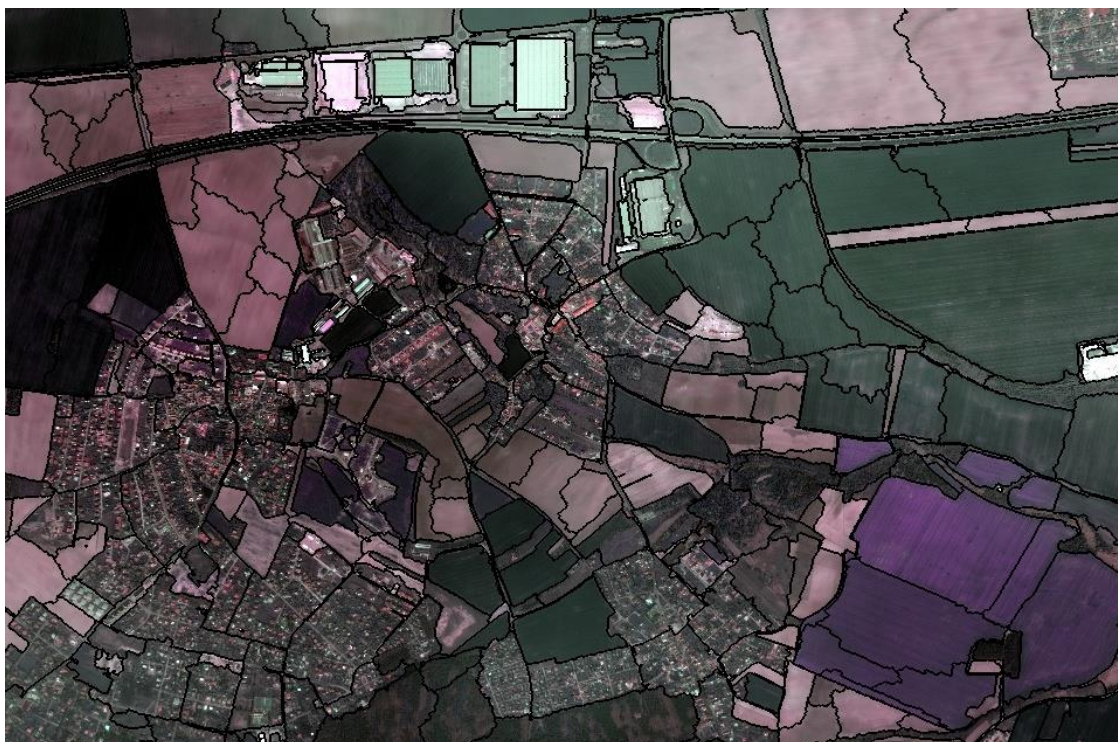
5.3 Multimeřítková segmentace obrazu

Družicový snímek, skládající se ze čtyř kanálů s prostorovým rozlišením 0,6 m, byl zobrazen v programu eCognition. Hledání vhodných klasifikačních pravidel začíná segmentací a pokračuje zásahem uživatele, který nad daným snímkem hledá vhodné klasifikační příznaky, které rozdělí snímek do jednotlivých tříd. Segmentace je automatizovaný proces, který vyžaduje pouze pro každý snímek specifické nastavení, zatímco hledání příznaků je plně v roli uživatele. Hledání klasifikačních pravidel obvykle probíhá opakovaně, jelikož není možné na první pohled jasně vymezit jednotlivé třídy a navíc některé objekty se po vizuální stránce jeví jako totožné, ale hodnoty odrazivosti v daném pásmu se mohou lišit. Jsou sice známy hodnoty odrazivosti pro běžně zastoupené typy krajinného pokryvu ve viditelném a části infračerveného záření, ale uživatel vždy musí najít konkrétní prahové hodnoty nad daným snímkem a z tohoto důvodu se proces nalezení vhodných klasifikačních příznaků pro jednotlivé třídy několikrát opakuje. Samotná klasifikace je opět automatický proces, do kterého vstupují jednotlivé třídy, které byly nalezeny nad daným územím.

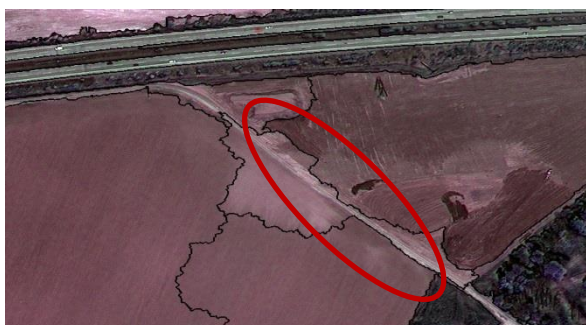
Nejprve byla provedena segmentace obrazu, která rozdělí snímek do relativně homogenních objektů. Program eCognition nabízí více druhů segmentace, v tomto případě byla zvolena multimeřítková segmentace, která spadá do kategorie „Bottom-up“. Typické pro tuto skupinu algoritmů je, že začínají u jednotlivého pixelu, ke kterému jsou přidávány další a segmentace končí v okamžiku, kdy míra homogenity klesne pod určitou hranici. Multimeřítková segmentace se snaží dosáhnout kompromisu mezi spektrální a tvarovou

homogenitou. Před zahájením segmentace je nutné nastavit několik parametrů, které ovlivňují výsledek segmentace. Jedná se především o „scale parameter“, kterým definujeme průměrnou velikost objektů, dále je důležitá kompaktnost („compactness“) a tvar objektů („shape“). Na základě prostudované literatury byla nejčastěji doporučována hodnota pro scale parameter mezi 25 až 30. Čím je hodnota parametru větší, tím jsou objekty větší a naopak. Kritérium tvaru („shape“) udává poměr, do jaké míry ovlivňuje segmentaci tvar objektu oproti barvě objektu. Hodnota tvaru může být až do 0,9. Stejným způsobem funguje parametr kompaktnosti, který udává poměr ovlivnění výsledku segmentace kompaktností oproti hladkosti - „smoothness“ (eCognition Guide, 2012). Čím vyšší je hodnota kompaktnosti, tím více může být kompaktnější objekt obrazu.

Segmentace obrazu byla původně testována na družicových datech v jedné úrovni, ale i přes různá nastavení, se ukázala jako nedostačující. Kvalitních výsledků bylo dosaženo až po nadbytečném použití mnoha příznaků pro jednotlivé klasifikační třídy a výsledky nedosahovaly požadované kvality. Z tohoto důvodu byly zvoleny dvě segmentační úrovně. První segmentace má za úkol rozdělit snímek na velké homogenní plochy, jako jsou pole, louky a lesy, zatímco druhá úroveň segmentace se týká především oddělení zástavby a komunikací. Pro nastavení první segmentace je určující především velikosti objektů, zatímco kompaktnost a tvar objektů jsou klíčové pro druhou segmentaci obrazu. Po otestování více druhů nastavení byla nakonec zvolena segmentace s parametry: velikost objektů 500, kompaktnost 0,8 a tvar objektů 0,5. Výsledek první segmentace obrazu je vidět na obr. 9. Snímek vypadá na první pohled vhodně rozdělený, oblasti polí a luk jsou jasně oddělené od třídy ostatní. V průběhu segmentace ale nastal problém se správným zařazením komunikace, který je patrný na obr. 10. Došlo ke spojení cesty s okolním krajinným pokryvem, v tomto případě s polem a to i přesto, že cesta je na snímku patrná. V důsledku toho není cesta detekována jako samostatný pruh nebo jako součást třídy ostatní, jako tomu je v ostatních případech, ale je součástí větší plochy.



Obr. 9 Výsledek první segmentace nad obcí Jirny

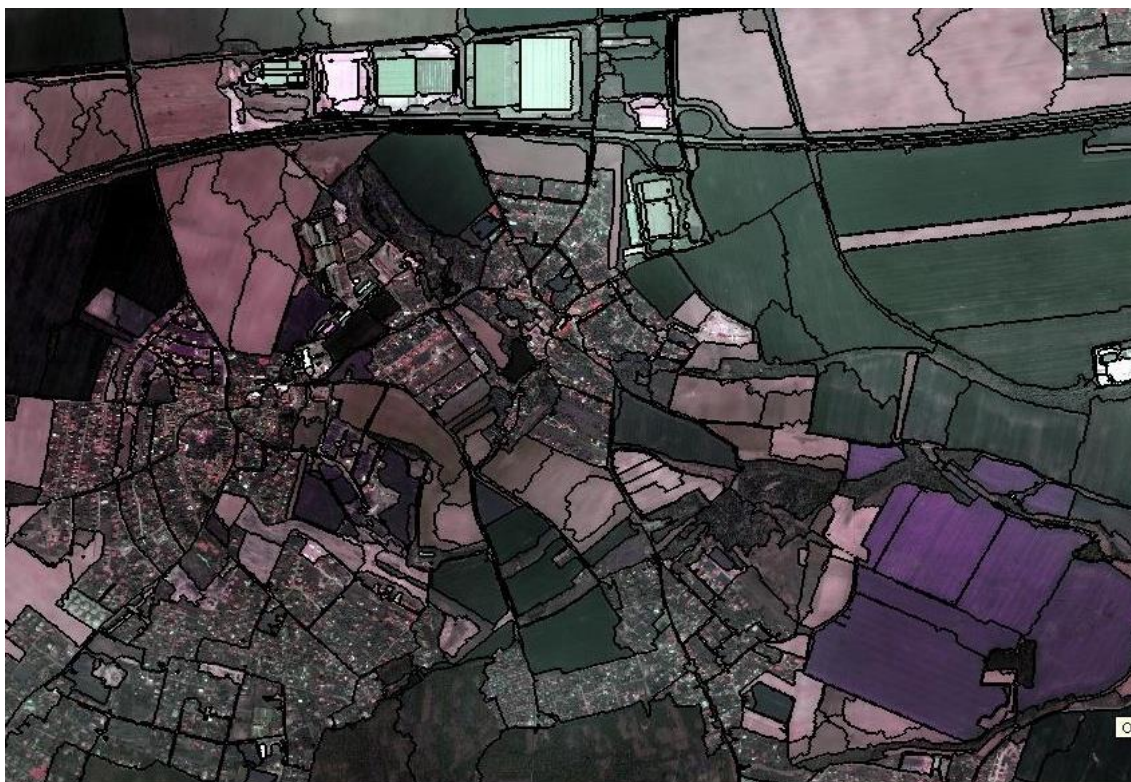


Obr. 10 Oblast špatně segmentované cesty

Segmentace první úrovně byla nad takto vytvořenou vrstvou provedena klasifikace, i přes výše uvedený problém. Bohužel ani přes změnu nastavení jednotlivých příznaků tříd nebylo dosaženo odpovídajícího výsledky a především z důvodu špatné klasifikace cesty na obr. 10 byla provedena nová segmentace obrazu. Bylo testováno nejprve nastavení změny velikosti objektů, ale výsledek se příliš neměnil – cesta byla stále součástí velkého objektu, proto bylo přikročeno ke změně ostatních parametrů segmentace, zatímco velikost objektů byla ponechána. Jedná se o iterativní postup, během kterého byly definovány především parametry tvaru a kompaktnosti, jelikož se ukázalo, že velikost objektů je v tomto případě druhotná. Při hledání vhodného nastavení segmentace první úrovně pro oblast obce Jirny byl problém především s oddělením dvou hlavních vodních ploch od okolí a také správné oddělení problematické cesty z obr. 10. Vodní plochy jsou dobře odlišitelné v pásmu blízkého infračerveného záření a většinou není problém je správně klasifikovat. V průběhu testování vhodných parametrů nastavení první segmentace ale docházelo k tomu, že větší vodní plocha

(Návesní rybník) byla zařazena do objektu, který obsahoval i okolní vegetaci a docházelo ke změně hodnot odrazivosti v blízkém infračerveném pásmu daného objektu a neodpovídala tedy třídě vodních ploch. Druhý problém se správným vymezením vodní plochy se týkal druhého, menšího a severněji ležícího, rybníku, který při změně parametrů tvaru a kompaktnosti objektů byl přidělen do objektu, který odpovídal třídě ostatní. To by nebyla až taková komplikace, jelikož by vstupoval do druhé segmentace obrazu a zde by mohl být správně klasifikován. Ukázalo se ale, že v průběhu druhé segmentace je rozdělen na menší objekty, které ale svojí odrazivostí neodpovídají třídě vodních ploch. Jihovýchodní část rybníka se jeví na družicovém snímku mírně zakalená a hodnotami odrazivosti odpovídá spíše třídě polí. Dochází tedy k tomu, že rybník není klasifikován jako celek a bylo by nutné nalézt nový příznak, který by dokázal dané objekty správně přiřadit do třídy vodních ploch. Tato varianta se ukázala jako nerealizovatelná, jelikož zavedení dalšího příznaku nebylo jednoznačné a docházelo k příliš velkým změnám při druhé klasifikaci, a proto bylo zkoumáno jiné nastavení první segmentace obrazu.

Nakonec má nová segmentace první úrovně stejný parametr velikosti objektů jako v prvním případě, ale tvar objektů je nastaven na hodnotu 0,4 a kompaktnost je 0,6. Nově je tedy kladen menší důraz na tvar objektu, ale stále je důležitější než barva a naopak požadavek na kompaktnost/hladkost je mírně vyšší než v prvním případě. Výsledek nové segmentace obrazu nad obcí Jirny je vidět na obr. 11. V rámci nové segmentace byl odstraněn problematický objekt z obr. 10, oblast okolo cesty byla přiřazena k okolní ploše pole a vznikl tak nový objekt, který kopíruje průběh cesty. Obě vodní plochy, které působily komplikace v průběhu testování vhodného nastavení parametrů segmentace, jsou samostatnými objekty a neměl by nastat problém s jejich klasifikací.



Obr. 11 Nová segmentace první úrovně obrazu nad obcí Jirny

5.4 Klasifikace homogenních ploch

Do první úrovně segmentace vstupují pouze družicová data, nad kterými budou klasifikovány třídy pole, louky, vodní plochy, lesy a ostatní. Třída vodní plochy byla vymezena pomocí nízké odrazivosti v blízkém infračerveném pásmu – příznak Mean NIR. Vodní hladina se chová v oblasti blízkého infračerveného pásma téměř jako absolutně černé těleso a jak je i vidět na obr. 11, vodní plochy patří mezi nejtmašími objekty na družicovém snímku. Tuto domněnku potvrdilo také zobrazení příznaku Mean NIR pomocí nástroje Feature View, kde při nastavení prahových hodnot byly vodní plochy téměř černé. V praxi se ukázalo, že samotné vymezení odrazivosti vodní plochy v blízkém infračerveném pásmu nestačí. Dálnice D11, která prochází severní částí snímku, je v západní části pokryta novým povrchem, který má velmi blízkou odrazivost jako vodní plochy a na snímku se jeví podobně tmavý. Po porovnání hodnot odrazivosti pro blízké infračervené pásmo této části dálnice a vodních ploch v Image Object Information bylo nastaveno rozmezí hodnot odrazivosti pro Mean NIR mezi 161 a 227,1. Po této úpravě tedy třída vodní plochy obsahuje dva objekty, ostatní vodní plochy budou detekovány až ve druhé klasifikaci, jelikož se nacházejí v blízkosti zástavby a v první segmentaci nebyly klasifikovány jako samostatné objekty.

Jako další byly klasifikovány třídy pole a louky. Obě třídy se často prolínají a mění se způsob využití jednotlivých oblastí v průběhu let, proto je na současných leteckých snímcích jiné rozložení využití půdy než v roce 2007, ze kterého pochází testovaný snímek. Vzhled povrchů pokrytých vegetací je na družicových snímcích ovlivňován především vnějším uspořádáním

vegetačního krytu, vnitřní strukturou jednotlivých částí rostlin, obsahem vody, zdravotním stavem a vlastnostmi půdního substrátu (Dobrovolný et al., 2001). Všechny uvedené charakteristiky nejsou pro snímek nad obcí Jirny známy, jelikož detailní rozdělení vegetace není předmětem práce. Snímek vznikl v dubnu, tedy na začátku vegetačního období rostlin, proto se oblast polí jeví v hodnotách odrazivosti podobně jako oblast luk. Bylo tedy nutné zavést příznak NDVI, který vyjadřuje vztah mezi odrazivostí v intervalu červené viditelné části spektra a v blízké infračervené části spektra:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Program eCognition nezná příznak NDVI, takže byla zvolena možnost vytvoření nového aritmetického příznaku. Pro třídu pole byly zvoleny prahové hodnoty příznaku NDVI mezi 0,1165 a 0,56. Třída louky má nastaveny prahové hodnoty mezi 0,469 a 0,87. K překryvu obou tříd dochází pouze v malé části a na výsledné klasifikaci to není patrné. K odlišení třídy louky a pole postačuje příznak NDVI, ale k rozlišení třídy pole a třídy ostatní je nutné zvolit ještě další příznak. V blízkém infračerveném pásmu má holá půda nižší hodnoty odrazivosti než oblast zástavby, která obsahuje mimo jiné beton a asfalt. V příznaku Mean NIR jsou si obě třídy velmi podobné, ale v případě směrodatné odchylky tohoto pásma jsou rozdíly lépe patrné. Třída pole má tedy pro oblast obce Jirny prahové hodnoty pro příznak Standard Deviation NIR mezi hodnotami 0 a 61,3.

Třída lesy bude, vzhledem ke svým podobným vlastnostem se třídou luk a polí, klasifikována pomocí dat z leteckého laserového skenování, konkrétně vrstvy vegetace (viz obr. 7). Uvedená vrstva obsahuje veškerou vegetaci nacházející se v okolí obce Jirny a je tedy nutné vymezit pouze oblasti, které odpovídají lesnímu porostu a samostatně stojícím stromům. Původně byla testována i možnost klasifikaci třídy pole a louky pomocí dat ALS, ale vzhledem k velmi blízké výšce obou tříd nebylo oddělení jednoznačné. Pomocí nástroje Feature view, který umožňuje zobrazení jednotlivých příznaků pro celý snímek, a pomocí Image Object Table byly definovány jednotlivé prahové hodnoty pro příznak Mean vrstvy vegetace pro třídu lesy. Celkem byly vytvořeny čtyři kroky (Lesy 1 – 4), které vymezují z první segmentace obrazu lesní porost. Jejich vymezení dle prahových hodnot příznaku Mean vegetace je 171 – 179,2; 181,9 – 204; 237 – 256 a 225 – 226. Na základě této skutečnosti vznikla vrstva lesa, která obsahuje především lesní porosty v jižní části snímku, v okolí zámku Jirny, a také oblast lesa ve východní části snímku. Mezery mezi jednotlivými hodnotami příznaku Mean vegetace jsou způsobeny tím, že některé objekty obrazu (především kategorie ostatní) obsahovala blízké hodnoty třídě lesa. Tato skutečnost byla způsobena především různorodostí obsažených pixelů v jednotlivých objektech.

I přes opakované hledání vhodných prahových hodnot došlo k tomu, že některé objekty byly nesprávně zařazeny. Bylo tedy přistoupeno k ruční editaci a vznikly tak další kroky úpravy první klasifikace. Jedná se celkem o pět objektů, které byly klasifikovány jako pole, ale obsahují část komunikací. Tři z uvedených objektů se nacházejí uvnitř zástavby, představují uliční síť a

byla tedy využita informace z vrstvy budov (příznak Mean). Jejich hodnoty tohoto příznaku se natolik lišily, že bylo nutné zavést je jako samostatné kroky (Silnice 1 – 3), které tyto objekty přiřadily do třídy silnic. Další ze špatně klasifikovaných objektů reprezentoval část dálnice a zde byla využita hodnota příznaku Mean vegetace (Silnice 4), která původní objekt pole zařadila do třídy silnic. Posledním problematickým prvkem, který se týkal třídy silnic, se nachází v severní části snímku a obsahuje část silnice č. 101 a příjezdovou cestu k budově. Na základě hodnot příznaku Mean vegetace (Silnice 5) byl také zařazen do třídy silnic. V průběhu první klasifikace došlo ke špatnému vymezení ještě jednoho objektu. Konkrétně se jedná o budovy v blízkosti sjezdu z dálnice D11, které byly klasifikovány jako třída pole. Předpokladem bylo, že bude pomocí vrstvy budov správně klasifikován, ale informace z vrstvy budov zde chybí. Bylo tedy testováno opětovné nastavení příznaků pro třídu pole, ale nebylo dosaženo změny a proto tento objekt nebude vstupovat do druhé klasifikace a bude patřit mezi špatně zařazené objekty. Třída ostatní vznikne negací všech předchozích tříd, jelikož bude vstupovat podrobněji do klasifikace až při druhé segmentaci. Výsledek první klasifikace velkých objektů obrazu je možné vidět na obr. 12. Třída louky je znázorněna světle zelenou barvou, třída pole okrovou barvou, vodní plochy reprezentuje modrá barva, lesy jsou tmavě zelené, silnice mají červenou barvu a kategorie ostatní je zobrazena šedivou barvou.



Obr. 12 Výsledek první klasifikace - Jirny

Objekt, který byl původně špatně segmentován, jak je vidět na obr. 10, byl v nové segmentaci správně rozdělen a klasifikován jako třída ostatní a bude tedy také součástí druhé segmentace obrazu.

5.5 Druhá segmentace a klasifikace obrazu

Druhá segmentace slouží k vymezení dalších krajinných prvků, které nezabírají výrazně homogenní plochy, jako tomu bylo v případě první segmentace. Druhá segmentační úroveň byla zařazena také z důvodu nižší výpočetní náročnosti, jelikož nepracuje s celým snímkem, ale pouze s třídou ostatní, kterou jsme získali první segmentací. Účelem druhé segmentace je klasifikování nehomogenní objektů obrazu, které obsahují více typů krajinného pokryvu a je nutné odlišné nastavení parametrů segmentace. Ve druhé segmentaci jde především o velikost prvku, která je menší než v případě první segmentace a byla zvolena, po mnoha různých nastaveních, hodnota 28, tvar objektů 0,8 a kompaktnost 0,5. Výsledek druhé segmentace snímku je na obr. 13.



Obr. 13 Druhá segmentace obrazu - Jirny

Cílem druhé objektové klasifikace je především rozdělení kategorie ostatní na třídu budov a komunikací. V případě třídy komunikací nastane největší konflikt právě s třídou budov, jelikož jsou tvořeny z podobných, místy i stejných, materiálů. Do druhé klasifikace vstupují opět i data z leteckého laserového skenování. Díky nim bude možné jednoznačněji detekovat třídu budov a eliminovat tak nejvíce konfliktní lokality s třídou silnice. Jako první bude klasifikována třída lesy, protože v první klasifikaci nedošlo k určení všech objektů, jelikož se nacházely v blízkosti budov a silnic. Tímto krokem také dojde ke snížení počtu objektů, které budou vstupovat do další fáze klasifikace. Byl využit příznak Mean vrstvy vegetace, prahová hodnota pro třídu lesy je v tomto případě 196,2, takže všechny objekty, které mají hodnoty příznaku Mean vegetace 196,2 nebo vyšší, patří do třídy lesů.

Druhá klasifikace pokračuje detekcí třídy budov, která bude určena pomocí vrstvy budov z dat leteckého laserového skenování (viz obr. 6). Vrstva budov byla zobrazena pomocí nástroje Feature View nad družicovými daty jako příznak Mean. Na základě zobrazených hodnot byla stanovena prahová hodnota 80, která vycházela z původních hodnot bodové vrstvy a všechny objekty obrazu s touto hodnotou nebo vyšší byly pomocí nástroje Assign Class z třídy ostatní klasifikovány jako třída budovy. V rámci klasifikace vrstvy budov došlo k eliminaci osamocených objektů bodové vrstvy, které byly sice v datech leteckého laserového skenování klasifikovány jako body odpovídající kategorii budov, ale při porovnání nad snímkem se nacházely nad vrstvami polí a luk. Výsledek klasifikace třídy budov a lesů je na obr. 14, kde budovy jsou znázorněny žlutou barvou a lesy mají tmavě zelenou barvu.



Obr. 14 Výsledek klasifikace tříd budov a lesů nad obcí Jirny

Nyní je tedy možné přistoupit k samotné klasifikaci silniční sítě, která je cílem této práce. Jeden z hlavních problémů detekce komunikací, podobnost použitých materiálů, byl díky vrstvě budov z dat leteckého laserového skenování minimalizován. Nyní tedy zbývá vyřešit okolo stojící vegetaci, která v době pořízení družicového snímku vrhala stíny na silniční síť a znemožňuje kvalitní automatickou detekci silniční sítě a také problém větších ploch, jako jsou parkoviště. Při pohledu na data z leteckého laserového skenování, kde vegetace lemovala jednotlivé silnice, a budovy byly uvnitř zástavby, se nabízel možnost využití právě chybějící informace o komunikacích. Prvotním předpokladem bylo, že třída ostatní obsahuje pouze silniční síť a malé oblasti, které s největší pravděpodobností patří do tříd pole, louky a vodní plochy, jelikož došlo ke kompletní detekci budov a lesního porostu. Za ideálního stavu by tedy bylo možné aplikovat dvě podmínky – vrstva budov a vegetace z dat ALS, která je rovna nule,

patří do třídy silnic. A takto vytvořenou třídu by stačilo pouze upravit a doplnit pomocí dalších příznaků. Ve skutečnosti, ale vrstvy z dat ALS obsahují mnohem méně objektů, které jsou rovny nule, což je dáno především stíny, které vrhá vegetace a jednotlivé budovy. Výška stromů ve skutečnosti není konstantní, a proto bylo nutné do klasifikačního procesu zařadit další dva kroky, které detekují další stromy z vrstvy vegetace. Opět byl využit příznak Mean vegetace a pomocí prahových hodnot byly zavedeny dva kroky: Lesy vegetace 1 – 2, které doplňují třídu lesů o samostatně stojící stromy podél silnic a v okolí budov. Oba kroky byly do klasifikace zařazeny až po provedení několika nastavení správné klasifikace silniční sítě, především z důvodu kolize s třídou silnic.

Jak se ukázalo dříve, rozdílné povrchy komunikací působí značné problémy, a proto byla provedena nejprve klasifikace části dálnice, která je pokryta tmavším povrchem. Vzhledem k tomu, že se tyto objekty jeví jako nejtmaší již při detekci vodních ploch, tak byl využit příznak Mean NIR s prahovými hodnotami 215 a 240. Poté následovala hlavní klasifikace třídy silnic, která je založena především na příznaku Ratio jednotlivých vrstev. Tento příznak počítá poměr mezi hodnotou příznaku objektu obrazu a průměrem hodnot příznaku jeho sousedů vybrané třídy (eCognition Guide, 2012). Pro průměrování hodnot příznaku jsou váhami oblasti odpovídající objektům snímku. Navíc při hledání vhodného příznaku pomocí Feature View byly silnice nejlépe patrné právě v případě příznaků Ratio. Nakonec byl využit příznak Ratio pro vrstvy Green (0,1447 – 0,2513), NIR (0,17375 - 0,31) a Red (0,16 – 0,227). Kombinace těchto tří příznaků byla ještě doplněna o informaci o odrazivosti v zelené části spektra, konkrétně jeho směrodatná odchylka (11,5 - 35,8). Klasifikace se ukázala v některých částech snímku stále jako nedostačující, a proto bylo jako další krok zvoleno nastavení šířky komunikace na 6 – 12 m, díky kterému byly doplněny části chybějících úseků komunikací. Posledním příznakem, který byl použit k detekci silniční sítě, byla asymetrie. Čím je objekt delší, tím více je asymetrický. Hodnoty asymetrie se pohybují v intervalu 0 – 1. Pro třídu silnic byly zvoleny hodnoty asymetrie mezi 0,8 a 1. Především v oblasti dálnic došlo k nesprávnému zařazení objektů lesa do třídy silnic. Další krok tedy přiřazuje objekty s hodnotami příznaku NDVI mezi 0,267 a 0,28 ze třídy silnic do třídy lesa. Posledním krokem je klasifikace zbylých objektů ve třídě ostatní, do které vstupují třídy pole, louky, lesy a vodní plochy. Prahové hodnoty příznaků jednotlivých tříd jsou definovány výše, pro třídu lesů v tomto případě bude využit příznak NDVI s prahovými hodnotami 0,19 a 0,57. Kategorie ostatní obsahuje objekty, které neodpovídají žádné z výše popsaných tříd a obsahují především okolí komerčních budov a část střechy budovy, která byla z důvodu chybějící informace z dat ALS špatně detekována. Výsledek klasifikace je vidět na obr. 15, jednotlivým třídám odpovídají stejné barvy jako v předchozích krocích. Výsledek je také přílohou č. 7. Kompletní postup klasifikace je přílohou č. 6, jednotlivá nastavení příznaků pro klasifikované třídy jsou zobrazeny v přílohách č. 1 – 5.



Obr. 15 Výsledek objektové klasifikace nad obcí Jirny

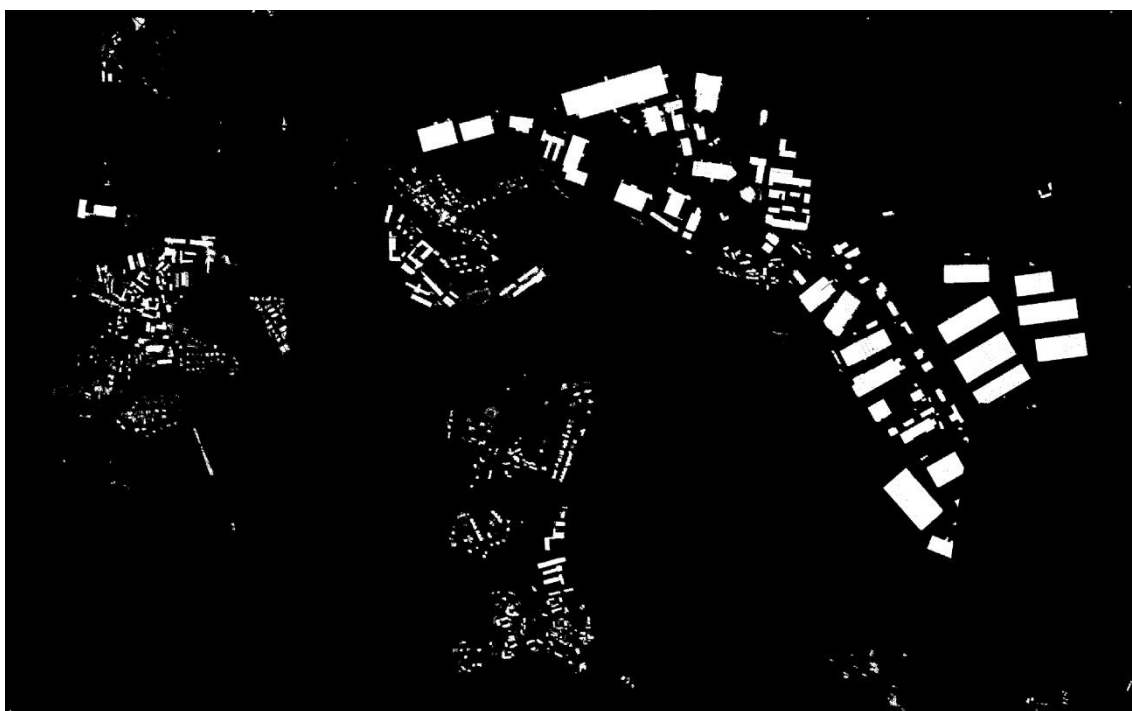
5.6 Přenositelnost klasifikační báze

Obec Modletice je vzdálená od obce Jirny přibližně 22 km a snímek obsahuje podobné krajinné prvky. Předzpracování družicových dat bylo stejné jako v případě obce Jirny. Ze snímku bylo vybráno území o velikosti 4748 x 2960 m (viz obr. 16). Na první pohled je patrné, že v této lokalitě není dominantní zástavba, jako tomu bylo v případě obce Jirny, ale nachází se zde více zemědělské plochy a také logistické zázemí zabírá větší prostor.



Obr. 16 Výřez z družicového snímku nad obcí Modletice

Do klasifikace opět vstupují i bodové vrstvy z dat ALS, které byly převedeny do rastrové podoby stejným způsobem jako v případě obce Jirny. Vrstva budov je na obr. 17 a vrstva vegetace je na obr. 18.



Obr. 17 Vrstva budov z leteckého laserového skenování – Modletice



Obr. 18 Vrstva vegetace z leteckého laserového skenování – Modletice

Program eCognition umožňuje uložení kompletní sady pravidel a následné načtení nastavení do jiného projektu. Byly tedy uloženy jednotlivé třídy a prahové hodnoty jejich příznaků a dále jednotlivé kroky klasifikace obrazu. Prahové hodnoty pro jednotlivé třídy zůstaly stejné a výsledek přenesené klasifikační báze je vidět na obr. 19. Na první pohled je patrné, že především dálnice neodpovídá třídě silnic. Třída vodních ploch je oproti skutečnosti zastoupena menším počtem, lesní porost také zcela neodpovídá reálnému rozložení v krajině. Třída polí a luk je rozdělena, až na malé výjimky, správně. Kategorie budov, především v oblasti logistických objektů, odpovídá skutečnému stavu na snímku. Třída silnic obsahuje alespoň části hlavních komunikačních tahů, uliční síť zde prakticky neexistuje, takže v oblasti zástavby je těžké hodnotit správnost zařazení do třídy. Nejpatrnější nepřesností je špatné zařazení prakticky celé dálnice do třídy vodních ploch. Je to dáno především použitým povrchem, který je velmi podobný materiálu použitým na část dálnice D11 na snímku v okolí obce Jirny. Jeví se tedy na snímku jako velmi tmavý a proto jeho hodnoty odrazivosti jsou nejbližší třídě vodních ploch. Z tohoto důvodu je tedy nesprávně zařazen, a potvrzují to i ostatní komunikace, které v místech, kde nejsou detekovány jako silnice, spadají do ostatních tříd, ale nikoliv do třídy vodních ploch, jelikož jsou pokryty jiným (světlejším) materiálem. Některé třídy sice vykazují správné rozdělení, ale celkově se dá říci, že výsledek neodpovídá reálnému rozdělení krajinného pokryvu, a proto bylo přistoupeno k modifikaci pracovního postupu klasifikace.



Obr. 19 Výsledek přenesené klasifikační báze - Modletice

5.6.1 První segmentace a klasifikace

Vzhledem k ověření alespoň správnosti použitých příznaků, nedojde ke změně celého postupu. Budou měněny pouze prahové hodnoty jednotlivých příznaků, základní postup zůstane stejný. Zpracování družicového snímku obce Modletice začalo tedy první segmentací obrazu se stejnými parametry jako v případě obce Jirny (velikost objektů 500, tvar objektů 0,4 a kompaktnost 0,6). Výsledek první segmentace je vidět na obr. 20.



Obr. 20 Výsledek první segmentace nad obcí Modletice

Dalším krokem je klasifikace objektů vzniklých první segmentací obrazu do tříd pole, louky, vodní plochy, lesy a ostatní. Při použití stejného nastavení příznaků jako v případě obce Jirny nedošlo ke správné klasifikaci vodních ploch, naopak byla do třídy vodních ploch zařazena téměř celá dálnice (viz obr. 19). Co se týká přesnosti určení třídy pole, tak dopadla velmi dobře, jediné špatně klasifikované oblasti jsou vodní plochy, jinak ostatní objekty reprezentují na družicovém snímku pole. Třída louky je také ve většině případů správně zařazena, pouze některé objekty, které jsou na snímku viditelné jako les, byly určeny také jako louky. Z výše uvedených důvodů bylo přistoupeno k úpravě prahových hodnot jednotlivých příznaků.

Třída vodních ploch má tedy pro oblast obce Modletice hodnoty příznaku Mean NIR mezi 80 a 177, třída luk má prahové hodnoty pro příznak NDVI od 0,51 do 0,87 a třída polí má hodnoty příznaku NDVI mezi 0,1249 a 0,46, zatímco příznak Standard deviation NIR má prahové hodnoty stejné jako v oblasti obce Jirny. Oproti první lokalitě se zde ukázala jako nejvíce problematická třída vodních ploch. I přes otestování změny prahových hodnot příznaku Mean NIR nedošlo ke zlepšení klasifikace a proto bylo nutné přistoupit k přidání dalších kroků, během kterých byla modifikována třída vodních ploch. Uvedené problémy jsou způsobeny především tmavými plochami střech a stíny, které vrhají budovy. Z tohoto důvodu jsou hodnoty odrazivosti v blízkém infračerveném pásmu téměř totožné s hodnotami odrazivosti pro vodní plochy a přidání dalšího příznaku problém neeliminovalo. Modifikace třídy vodních ploch začíná bodem, který je nazván Úprava klasifikace - budovy, který na základě informace z vrstvy budov (Mean budovy > 48) správně klasifikuje dvě tmavé střechy v oblasti obce Herink (východní část snímku) a jednu střechu budovy v blízkosti dálnice D1 z kategorie vodních ploch do třídy budov. Vzhledem k druhé segmentaci obrazu bylo zbytečné takto klasifikované střechy zařazovat do třídy ostatní, jelikož by došlo pouze ke zbytečnému rozdělení na menší objekty. Další čtyři kroky (Úprava vodní plochy 1 – 4) využívá informace z vrstvy vegetace, konkrétně příznak Mean, a na základě prahových hodnot přiřazuje objekty z okolí komerčních budov do kategorie budov. Klasifikování těchto prvků muselo proběhnout ve čtyřech krocích, jelikož jejich hodnoty ve vrstvě vegetace byly natolik odlišné, že nebylo možné zvolit rozsah hodnot, aniž by nedošlo ke špatné klasifikaci ostatních objektů.

Body Úprava pole 1 – 3 přeřazují špatně klasifikované objekty ze třídy polí do třídy silnic. Dle hodnot příznaků byly tyto objekty klasifikovány jako pole, ale ve skutečnosti odpovídají spíše třídě silnic, jelikož se jedná o příjezdové komunikace a parkoviště. Pomocí prahových hodnot příznaku Mean vrstvy budov byly klasifikovány jako silnice. Ze stejných důvodů jako v předchozím případě je tato úprava provedena ve třech krocích.

Po provedených úpravách jednotlivých tříd, přichází na řadu klasifikaci lesa. Nejprve je lesní porost vymezen pomocí příznaku NDVI s prahovými hodnotami 0,467 – 0,57. Tento příznak se v případě obce Modletice ukázal mnohem průkaznější než klasifikace pomocí vrstvy vegetace, která byla vytvořena z dat ALS. Takto vytvořenou vrstvu je třeba dále upravovat, jelikož byly špatně klasifikovány objekty uvnitř obcí a proto byly zavedeny dva kroky s názvem Úprava lesy 1 – 2, které ze třídy lesů pomocí příznaku Mean NDVI zařazují tyto objekty do třídy ostatní.

Klasifikace třídy lesa nebyla stále kompletní, takže byly přidány další tři body, které se jmenují Klasifikace lesy NDVI 2 – 4, které pomocí příznaku NDVI zařazují objekty do třídy lesa. Při porovnání hodnot příznaků v Image Object Table se překvapivě ukázalo, že v případě obce Modletice je mnohem přínosnější příznak NDVI než informace o vegetaci z dat leteckého laserového skenování. Kategorie ostatní byla klasifikována jako negace všech ostatní tříd vstupujících do první klasifikace.

Výsledek modifikované první klasifikace obrazu nad obcí Modletice je vidět na obr. 21, kde vodní plochy jsou zobrazeny modrou barvou, louky jsou světle zelené, pole mají okrovou barvu, žlutou barvou jsou budovy, silnice představují červenou barvou, lesy jsou tmavě zelené a třída ostatní je reprezentována barvou šedou.



Obr. 21 Výsledek první klasifikace nad obcí Modletice

5.6.2 Druhá segmentace a klasifikace

Nad snímkem z lokality obce Modletice následovala segmentace druhé úrovně, do které vstupovala pouze kategorie ostatní. Parametry druhé segmentace byly ponechány stejné jako v případě obce Jirny, tedy velikost objektů 28, tvar objektů 0,8 a kompaktnost 0,5. Výsledek druhé segmentační úrovně je vidět na obr. 22.



Obr. 22 Druhá segmentace nad obcí Modletice

Vzhledem ke správnému vymezení třídy lesa v rámci první klasifikace, začíná druhá klasifikace určením třídy budov. Původní nastavení, které bylo použito nad oblastí obce Jirny, sice na první pohled vypadalo v pořádku, ale při bližším prozkoumání jednotlivých obcí bylo nutné prahovou hodnotu pro příznak Mean vrstvy budov upravit, konkrétně na hodnotu 171. Dalším krokem byla klasifikace silniční sítě. Byla testována změna prahových hodnot jednotlivých příznaků a nakonec se ukázalo, že příznak Standard deviation Green je v tomto případě nadbytečný. Postačila tedy kombinace příznaků Ratio z vrstev Red, Green a NIR. Dalším krokem byla detekce silnice na základě šířky, tentokrát v intervalu 7,4 – 12 m. Jako poslední byla využita informace o asymetrii, která má v tomto případě mnohem menší rozsah hodnot, a to 0,97 – 1. Nakonec byla provedena klasifikace zbývajících objektů vrstvy ostatní a výsledek druhé klasifikace nad obcí Modletice je vidět na obr. 23. Celý klasifikační postup je přílohou č. 14, jednotlivé příznaky pro klasifikované třídy v okolí obce Modletice jsou součástí příloh č. 10 - 13, výsledná klasifikace je přílohou č. 15.



Obr. 23 Výsledek objektové klasifikace - Modletice

6 Výsledky

Objektově orientovaná klasifikace nabízí mnoho možností využití. V tomto případě byla použita pro klasifikaci silniční sítě za použití dvou typů dat. Nejprve byla vytvořena klasifikační báze nad územím obce Jirny a následně byla aplikována nad oblastí obce Modletice. Jedním z cílů bylo ověřit možnost přenesení klasifikačních pravidel mezi podobnými lokalitami. Hlavním cílem bylo nalezení vhodných klasifikačních příznaků pro detekci komunikací. V této části práce budou zhodnoceny především výsledky aplikovaného postupu.

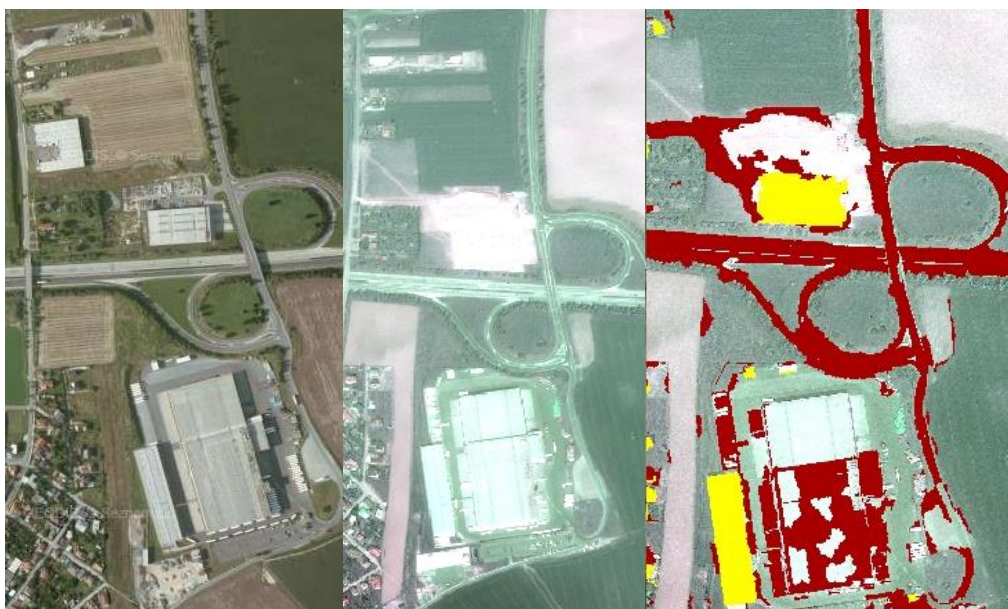
Klasifikační báze vznikala nad obcí Jirny a bylo vyzkoušeno mnoho variant vhodného nastavení, jednotlivé kroky a s nimi související problémy jsou popsány výše. Výsledná klasifikace reprezentuje skutečné rozdělení krajinných prvků v roce 2007, kdy vznikly snímky z družice QuickBird. Co se týče klasifikace samotné silniční sítě, tak výsledek je součástí přílohy č. 8. Zhodnocení přesnosti klasifikace je možné např. po vizuální stránce s původním snímkem z družice QuickBird, viz obr. 24.



Obr. 24 Porovnání výsledku klasifikace silnic s družicí QuickBird - Jirny

Lokalita obce Jirny obsahuje poměrně rozsáhlou uliční síť, která je na výsledku dobře patrná. Co se týká detekce dálnice, tak došlo k relativně dobrému vymezení. Vzhledem k charakteru dálnice, který je popsána v kapitole lokality, je dálnice na snímku z větší části rozdělena středovým pásem, část od sjezdu je spojena v jeden prvek, jelikož při výstavbě zde nebyl ponechán středový pás vegetace, protože se nepočítalo s dalším rozšířením dálnice. Středový pás není správně detekován v celé své délce, jelikož se vegetace místy jevila velmi podobně jako třída silnic a ani při využití informace z dat ALS nepřinesla kvalitnější výsledky. Docházelo zde naopak k tomu, že části dálnice byly zakryty okolo stojící vegetací a objekty dálnice byly klasifikovány jako třída lesů. V průběhu druhé klasifikace bylo zavedeno několik kroků, které měly tuto skutečnost napravit, ale bohužel celý středový pás se neshodoval v hodnotách jednotlivých příznaků a proto došlo ke správné detekci pouze některých částí. Hned za sjezdem z dálnice D11 došlo k přerušení vlivem mýtných bran, které jsou zde nainstalovány. Naopak sjezd z dálnice je velmi dobře viditelný, podařilo se vymezit připojené komunikace. Dobré výsledky uliční sítě jsou dány především možností využití informací z dat ALS, které odfiltrovaly nejvíce konfliktní prvky zástavby. Naopak velkým problémem se ukázala detekce příjezdových komunikací ke komerčním budovám. Z logického hlediska se jedná o komunikace, jsou pokryty stejným materiálem, ale nejsou součástí klasické silniční sítě. Bylo testováno mnoho různých příznaků, ale jednotlivé hodnoty si byly příliš podobné, než aby došlo k odstranění těchto objektů z třídy silnic. Posledním, výrazným, problémem je špatná detekce střechy jedné z budov, která je z části detekována jako pole (popsáno výše) a druhá část byla detekována z větší části jako silnice. Problém vznikl především kvůli chybějící

informaci z vrstvy budov dat ALS, a to i přesto, že budova se zde nacházela již v roce 2007, kdy vznikl družicový snímek. Při hledání příznaků, které by tuto budovu správně klasifikoval, došlo ke kolizi s třídou silnic – hodnoty si byly příliš podobné. Celý problém je patrný na obr. 25, který zobrazuje tři pohledy na stejnou oblast. První část (vlevo) je z aktuálního leteckého snímku (www.mapy.cz), v prostřední části je výřez z družice QuickBird z roku 2007 a vpravo je vidět výsledek klasifikace, který obsahuje pouze třídy budov a silnic. Budova se v jižní části výřezu opravdu nachází na všech třech snímcích, ale je správně detekována pouze přilehlá budova v levé části. Obrázek také zároveň poukazuje na druhý, špatně klasifikovaný, objekt, který se nachází nad dálnicí. Jedná o budovu, která je na aktuálním snímku dobře patrná, ale v roce 2007 je na stejném místě vidět pouze staveniště. Bohužel data ALS z roku 2010 již obsahují informaci o této budově, a proto došlo ke „správné“ klasifikaci dle aktuálního snímku, ale ke špatné dle použitého družicového.



Obr. 25 Porovnání výsledků problematické oblasti - Jirny

Další možností, jak porovnat kvalitu výsledné klasifikace je srovnání s existující geografickou databází (ZABAGED). ČÚZK poskytuje prohlížení většiny vlastních produktů na svých webových stránkách. Pro program ArcGIS, verze 10 a vyšší, umožňuje zobrazení některých dat díky službě WMS. Zobrazení výsledků objektové klasifikace silniční sítě nad vrstvou ZABAGED je součástí přílohy č. 9. Dálnice D11, silnice č. 101 a 611 jsou dobře patrné, uliční síť je reprezentována také celkem souvislou koustou. Jediným rozdílem je oblast na severu obce Šestajovice, kde nedošlo k detekci uliční sítě. Tato nesrovnalost je dána tím, že na testovaných družicových datech v dané lokalitě je pouze pole, výstavba domů zde není ani naznačena. Stejným problém nastal v oblasti nad jižní částí lesa snímku, kde sice je výstavba domů na družicovém snímku patrná, ale vzhledem k převažující holé půdě byla tato oblast klasifikována jako třída pole. Poslední částí, kde je viditelná silniční síť, ale nebyla správně klasifikována, je lokalita jižněji od Návesního rybníku, kde také mezi dobou pořízení

družicového snímku a aktuální vrstvou ZABAGED došlo k výstavbě nových domů. Na družicovém snímku není ani patrný případný záměr stavby. Co se týká správnosti klasifikace silnic, tak jediný rozdíl je v severní části snímku, kousek od železniční tratě, kde došlo k výstavbě logistického zázemí a byla k němu vytvořena příjezdová komunikace. V době pořízení družicového snímku se zde nachází pole. Nesrovnalosti, které vyplynuly ze srovnání s aktuální geografickou databází, jsou způsobeny především časovým rozdílem mezi klasifikovaným snímkem a vrstvou ZABAGED. Celkově se dá říci, že pokud budeme brát v úvahu pouze komunikace, které v době pořízení družicového snímku existovaly, tak můžeme klasifikaci silniční sítě v okolí obce Jirny hodnotit jako úspěšnou.

Druhá testovaná oblast se nachází v okolí obce Modletice. Vytvořená klasifikační báze nad obcí Jirny byla aplikována v nezměněné podobě, ale výsledek nebyl příliš kvalitní a proto byla uvedená klasifikace upravena. Obec Modletice obsahuje stejné krajinné prvky jako první lokalita, ale není zde tolik dominantní zástavba a prakticky zde neexistuje uliční síť. Objektová klasifikace z celkového hlediska dává dobrý výsledek, například třída vodních ploch byla po uvedených úpravách detekována správně. Samotná silniční síť dopadla nejlépe v oblasti dálnice, ostatní větší komunikace jsou místy přerušené a v oblasti zástavby se o souvislých cestách nedá příliš mluvit. Došlo zde také k většímu výskytu třídy ostatní, jelikož mnoho objektů mělo natolik rozdílné hodnoty jednotlivých příznaků, že nemohly být zařazeny do žádné jiné kategorie. V případě třídy budov nastal opět problém s chybějícími daty ALS. Jak je vidět na obr. 26 (vlevo aktuální letecký snímek – www.mapy.cz, uprostřed snímek z družice QuickBird, vpravo výsledek klasifikace třídy budov), nebyly klasifikovány hned tři budovy, jelikož chybí informace z dat ALS, a to i přesto, že dle aktuálního leteckého snímku budovy nebyly odstraněny. Opačným problémem je protáhlá budova v jižní části obrázku, která v době pořízení družicových dat neexistovala, ale v datech leteckého laserového skenování již část budovy je. Opět tedy nesouhlasí výsledek klasifikace třídy budov s družicovým snímkem.



Obr. 26 Porovnání výsledků problematické oblasti - Modletice

Při zobrazení třídy silnic nad družicovým snímkem (viz obr. 27), je vidět, že hlavní silniční tahy jsou jasně viditelné, vedlejší komunikace již tolik ne. Samotná vrstva silnic z okolí obce Modletice je součástí přílohy č. 16.



Obr. 27 Porovnání výsledku klasifikace silnic s družicí QuickBird - Modletice

Konfliktnost jednotlivých tříd zde není tak výrazná jako v případě první oblasti, zde je větší problém s poměrně velkou plochou výstavby v okolí obce Herink, která byla nakonec detekována jako třída silnic. Další komplikací je aktuálnost dat z leteckého laserového skenování. V době, kdy byly pořízeny, již byla postavena rychlostní silnice R1, v jejím okolí se nachází vegetace, která je součástí dat z ALS a tím pádem byla klasifikována místa, kde vegetace v roce 2010 je, ale v roce 2007 ještě nebyla v této podobě. Z tohoto důvodu byl také kladen větší důraz na příznak NDVI než na samotnou vrstvu vegetace. Do třídy silnic opět patří i příjezdové komunikace ke komerčním budovám a také oblasti výstavby nových bytových jednotek v lokalitě obce Herink. Porovnání s vrstvou ZABAGED (příloha č. 17) je tedy možné hodnotit pouze na základě stavu z roku 2007. I přesto, že klasifikovaná dálnice přesně kopíruje polohu dálnice ve vrstvě ZABAGED, tak klasifikované silnice dalších tříd jsou mírně „posunuté“. Hrubý obrys jednotlivých komunikací odpovídá vrstvě ZABAGED, ale z hlediska polohové přesnosti dochází k drobným odchylkám. Kromě chybějící rychlostní silnice, zde chybí několik silnic, které, ale vznikly až při výstavbě silnice R1 a proto nebyly detekovány. Chybějící uliční síť je také důsledkem časového rozdílu mezi družicovými daty a vrstvou ZABAGED. Pokud tedy nebudeme brát v úvahu „nově vzniklé“ komunikace, tak můžeme říci, že klasifikace silniční sítě odpovídá porovnávané vrstvě ZABAGED.

7 Diskuze

Výsledky obou provedených objektových klasifikací nejsou z hlediska detekce silniční sítě zcela stoprocentní. Vytvořená klasifikační báze nad obcí Jirny dává dobré výsledky – získané silnice odpovídají skutečnosti. Stále však dochází ke klasifikaci i ostatních prvků, které jsou tvořeny stejným materiálem jako silnice, ale představují příjezdové cesty, parkoviště nebo

dokonce i části budov. Pravdou je, že samotné družicové snímky by ale neposkytly srovnatelné výsledky, jelikož by bylo možné jednotlivé objekty oddělit pouze na základě hodnot odrazivosti jednotlivých pásem obrazu, což by vedlo k nadbytečnému počtu použitých příznaků, nikoliv ke zkvalitnění výstupů. Data z leteckého laserového skenování přináší doplňkovou informaci o výšce jednotlivých bodů a poskytují tak možnost kvalitnější klasifikace. Přínos dat ALS spočívá také v tom, že je možné lépe odfiltrovat stejné povrchy, které se nacházejí v zástavbě. To se mimo jiné potvrdilo v oblasti obce Modletice, kde chyběly informace o některých budovách, a proto docházelo k mylné klasifikaci. Jedním z důvodů, proč bylo nutné hodnoty některých příznaků mezi oběma lokalitami pozměnit, byla chybějící atmosférická korekce snímků, která by převedla hodnoty jednoho snímku vůči hodnotám druhého snímku – stejný typ povrchu by tedy měl na obou snímcích stejné hodnoty. Problémy s klasifikací byly způsobeny také odlišnou dobou pořízení obou typů dat. Nejvýrazněji je to patrné v lokalitě obce Modletice, kde na družicovém snímku chybí zcela rychlostní silnice, která ale v době pořízení dat ALS byla již postavena. Tři roky jsou přece jenom dlouhá doba a na snímku z okolí obce Jirny došlo například k výstavbě některých budov, které jsou na družicovém snímku pouze staveništěm. Pokud by oba typy dat byly ze stejného roku, tak by možná došlo k přesnější klasifikaci obrazu.

Velká část správného výsledku klasifikace spočívá již v samotném začátku, segmentaci. Nikde není uvedeno, jak moc důležitá samotná segmentace je, autoři se zmiňují především o správném nastavení jednotlivých klasifikačních příznaků. Pokud jsou špatně zvoleny jednotlivé parametry segmentace, tak výsledek nemůže být nikdy kvalitní, jelikož dojde k nereálnému rozdělení krajiny a tím pádem jednotlivé objekty obsahují mnoho různých pixelů, které kromě sousedství nemají nic společného. Nastavení segmentace je klíčové především z hlediska účelu využití výsledků. V případě, že hledáme pouze pole a louky, tak parametr velikosti bude větší, než v případě, kdy nás zajímají střechy jednotlivých budov. Segmentace byla rozhodující i v případě této práce. Bylo provedeno nepočítaně změn nastavení jednotlivých parametrů a stejně není možné říci, že zvolené řešení je ideální. Pro klasifikaci silniční sítě bylo klíčové rozdělení do dvou segmentačních úrovní, které usnadnily správné vymezení komunikací. Na základě vhodně provedené segmentace je následná klasifikace snazší, jelikož se dá předpokládat, že jednotlivé objekty snímku obsahují pouze pixely se stejnými nebo podobnými hodnotami. Během hledání vhodných klasifikačních pravidel docházelo k tomu, že silnice uvnitř zástavby byly viditelné při použití jiného příznaku než komunikace, které do zástavby vstupovaly minimálně. Bylo tedy nutné některé příznaky zavádět postupně, protože jinak by mohlo dojít ke špatné klasifikaci.

Dalším, překvapujícím, problémem byl samotný software eCognition. Testování klasifikační báze probíhalo v trial verzi programu, která dovoluje pracovat s daty stejně jako plná verze, ale chybí zde některé nadstavbové funkce a výsledky není možné exportovat. Otestovaná klasifikační báze byla kompletně nastavena (uložení pravidel trial verze nedovoluje), ale při nastavení stejných parametrů do starší, plné verze, programu nebyly výsledky totožné. Nekompatibilita jednotlivých verzí byla překvapující, protože bylo vycházeno z předpokladu, že hodnoty odrazivosti pro jednotlivá pásma stejného snímku se nemůžou lišit. Takže to, co bylo

dobrým výsledkem v testovací verzi, nebylo správným výsledkem v plné verzi. Pochopitelné by bylo, pokud by rozdíly nastaly u jednotlivých příznaků, kde se mohl změnit výpočet algoritmu, ale k problémům docházelo především u samotné segmentace obrazu. Jednotlivé objekty, které vznikly po segmentaci, nebyly totožné, i když parametry segmentace a testovaný snímek se nezměnily.

Původním předpokladem bylo, že v průběhu klasifikace dojde k oddělení třídy dálnice od třídy silnice. Hlavním příznakem měla být v tomto případě šířka komunikace, která vycházela z literatury. Jak se však v praxi ukázalo, dálnice je sice v některých místech širší než ostatní komunikace, ale rozdíly nejsou tak velké, aby došlo ke správnému vymezení. Klasická silnice má šířku dvou jízdních pruhů, dálnice je ve většině případů čtyřproudá. Ale v testovaných lokalitách se nacházejí dálnice, které se de facto skládají ze dvou samostatných, dvoupruhových, komunikací, které odděluje středový pás, většinou pokrytý vegetací. Takže i když uživatel ví, že se jedná o dálnici, program to vyhodnotí jako klasickou silnici. Výjimkou jsou připojovací pruhy a širší odstavňové pruhy, které ale nemusejí být stejně široké po celé délce dálnice. Následně tedy bylo vyzkoušeno mnoho příznaků, ale nepodařilo se nalézt takovou kombinaci, která by jasně oddělila dálnici v celé své délce od třídy silnic. Jedinou výjimkou byly oblasti, které byly pokryté novým (tmavším) materiálem. Jednalo se především o dálnice D1 na snímku z okolí obce Modletice a část dálnice D11 z oblasti obce Jirny. V případě obce Modletice by nebyl problém určit samotnou dálnici pomocí prahových hodnot příznaku Mean NIR. Ale jelikož bylo vycházeno z klasifikace nad obcí Jirny, kde ke klasifikaci dálnice v celé délce nemohlo dojít, ať už důvodu rozdílných materiálů nebo podobných hodnot odrazivosti s ostatními komunikacemi, tak je v obou lokalitách klasifikována pouze jedna třída – silnice. Příznak Mean NIR by navíc nebyl průkazný pro použití v jiných oblastech, protože vychází pouze z toho, že dálnice je pokryta novým materiálem, který se jeví podobně tmavý jako vodní plocha. Tato skutečnost, ale neplatí pro celou dálniční síť v České republice, a proto by nebylo možné brát tento příznak jako klíčový pro detekci dálnic.

Na začátku bylo také předpokládáno, že velkým problémem budou objekty nacházející se na komunikacích, ať už to jsou vozidla nebo vodorovné značení. V průběhu klasifikace se ukázalo, že některé menší objekty, jako jsou třeba automobily, jsou přiřazeny do větších objektů, které odpovídají kategorii silnic a nečiní tedy takové potíže, jak bylo očekáváno. Vodorovné značení se ukázalo být jako mnohem komplikovanější, jelikož je prostorově mnohem výraznější a navíc je vždy bílé a na snímcích je velmi dobře patrné. V případě silnic byl tento problém téměř ve všech případech eliminován, protože se jednalo pouze o linie oddělující dva pruhy nebo o vodorovné značení směru. Zato oblasti sjezdů z dálnic, kde se nachází výrazné „žebrování“, nebyly vždy klasifikovány jako celek. Výsledek se nezlepšil ani po změně prahových hodnot jednotlivých příznaků a proto jsou tyto části klasifikovány jako třída ostatní.

Problematikou detekce liniových prvků se zabývala i Soňa Kolankiewiczová (2009), která pracovala s družicovými daty v jiných lokalitách České republiky. Ve své práci se zabývala

především detekcí silnic a železnic, jedním z cílů bylo zjistit, zda je lepší pixelová nebo objektová klasifikace. Porovnání výsledků bude provedeno pouze s objektovou klasifikací. Oproti uvedené práci, zde byly využity informace z dat ALS, které přispěly především k odstranění stínů, které vrhá okolo stojící vegetace na silnice, což byl jeden z problémů, které autorka ve své práci uvádí. V souvislosti s vegetací totiž došlo místy až k přerušení silnic. Další komplikací byly budovy v zástavbě, což se autorce pomocí několika příznaků podařilo částečně odstranit, ale jak se ukázalo v této práci, při použití dat z leteckého laserového skenování dochází k lepším výsledkům, jelikož je snazší klasifikovat zástavbu a eliminovat tak nejvíce konfliktní třídu s kategorií silnic. Autorka také uvádí, že dobré výsledky v jedné z testovaných lokalit byly velmi dobré, ale v druhé, kde je hustější a členitější zástavba, nedochází ke stejné kvalitní detekci silniční sítě. Celkově se dá říci, že zavedené dalšího typu dat je z hlediska detekce komunikací přínosné.

Se stejnými lokalitami pracovala již Markéta Horňáková (2011) ve své práci, která se zabývala extrakcí budov a zpevněných ploch. Využívala také informace ze dvou typů dat (družicová data velmi vysokého rozlišení a data ALS), dosáhla velmi dobrých výsledků v případě budov, což byl jeden z cílů práce. Co se týká kvality výsledků silniční sítě, tak nejsou špatné, ale vzhledem k tomu, že klasifikační bázi vytvářela nad obcí Modletice a testovala její přenositelnost nad obcí Jirny, tak výsledky v oblasti obce Jirny jsou horší kvality. Je to částečně dáno tím, že v okolí obce Modletice je minimum ulic a zástavba je zde značně řidká. Zavedla zde také kategorii dálnic, ale ta byla úspěšně detekována pouze v oblasti obce Modletice, nikoliv v okolí obce Jirny. Autorka také pracovala pouze s jednou úrovní segmentace, což se projevilo na celkovém výsledku. Především v oblasti obce Jirny došlo k detekci malých oblastí uvnitř polí a také ke špatné klasifikaci vodní plochy. Dvě segmentační úrovně se ukázaly být velmi přínosnými, jelikož eliminace velkých homogenních ploch velmi zlepšila celkové výsledky. To ostatně potvrzuje ve své práci i Kolankiewiczová, která také na dané území aplikovala dvě segmentační úrovně. Z hlediska silniční sítě dospěla Horňáková k velmi podobným výsledkům, rozdíly jsou patrné pouze v tom, že klasifikační báze vznikla nad obcí Modletice, zatímco v této práci vznikala nad obcí Jirny, která má hustější zástavbu. V okolí obce Jirny nebyly například klasifikovány sjezdy v okolí osmého kilometru dálnice a uliční síť není zdaleka kompletní. Co se týče porovnání výsledků v okolí obce Modletice, tak jsou srovnatelné, možná pouze v případě některých vedlejších komunikací bylo dosaženo kompaktnějšího vzhledu než v uvedené práci.

Jedním z cílů práce bylo také zhodnocení zpřesnění existující databáze geografických dat na základě provedené klasifikace. Vzhledem k tomu, že výsledné klasifikace se liší pouze dobou pořízení, nikoliv v jednotlivých silnicích, tak je tato část diskuze zbytečná. Nebyly zjištěny žádné nedostatky, které by měly být opraveny.

8 Závěr

Objektová klasifikace není zatím automatickým procesem, bez zásahu uživatele nelze dosáhnout výborných výsledků. Vizuální stránka některých objektů je totiž často podobná hodnotám odrazivosti jiné třídy, než jaké reprezentují. Pouze uživatel, který dané území zná, případně má podklady pro porovnání, může správně zařadit některé sporné objekty. Program také nedokáže sám vyhodnotit vhodné nastavení parametrů segmentace, protože jsou pro každý snímek obrazu jiné, záleží především na účelu využití výsledků.

Výsledná klasifikace silniční sítě není dokonalá, stále obsahuje mnoho objektů, které patří do třídy silnic, ale nejsou jimi. Na obou územích jsou silnice dobře viditelné, hlavní linie zůstaly zachovány. Problém použití různých materiálů je stále nevyřešen, jelikož i přes důkladné nastavení parametrů jednotlivých příznaků nedošlo k jejich eliminaci. Komplikací bylo také to, že mezi dobou pořízení družicového snímku a daty leteckého laserového skenování uběhly tři roky. Za tu dobu došlo především k výstavbě nových budov, ale také k výstavbě nových silnic. V případě obce Modletice se jednalo dokonce o rychlostní komunikaci, takže změna krajiny byla poměrně výrazná.

I přes všechny uvedené potíže je možné celkovou klasifikaci hodnotit kladně, jelikož k detekci silniční sítě došlo a při srovnání s aktuální vrstvou ZABAGED je vidět, že všechny komunikace (včetně uliční sítě) jsou dobře patrné. Pro další práce na podobné problematice by bylo dobré, kdyby byla k dispozici data, která byla pořízena ve velmi krátkém časovém intervalu. Co se týká kvality dat, tak optická data s velmi vysokým rozlišením jsou dostačující, data leteckého laserového skenování s bodovou hustotou do 2 na m² přinášejí dobrý pohled na krajinu, ale přesnější data by napomohla např. k lepšímu vymezení střech budov a k lepší eliminaci podobných materiálů. S tím ale souvisí velký nárok na výpočetní techniku, protože již při použité bodové hustotě byla doba zpracování velmi dlouhá.

Cílem práce bylo klasifikování silniční sítě za použití dvou různých typů dat. Výsledné vrstvy silnic pro obě území odpovídají komunikacím v době pořízení družicového snímku. Jediné, co se nepodařilo vyřešit je odstranění detekce příjezdových komunikací a parkovišť. Naopak problematika stínů, které vrhá okolo stojící vegetace a budovy, byl díky vrstvě dat z leteckého laserového skenování eliminován. Zlepšení by do budoucna mohly přinést právě data ALS, které v sobě nesou i informaci o intenzitě, ve které se jednotlivé silnice jeví jako tmavé pásy. Další možností by bylo vytvoření pomocné vrstvy z dat ALS, která by obsahovala parkoviště. Problémem stále zůstává, jak z bodů ALS získat pouze parkoviště, která jsou v mnoha svých vlastnostech totožné se silnicemi. Uvedený klasifikační postup je zcela jistě aplikovatelný i na jiná území v České republice, ale pravděpodobně by musel být opět modifikován, jelikož komunikace jsou pokryty různými materiály, které nemusely být zastoupeny v testovaných lokalitách. Celkově je možné říci, že použití dvou typů dat přináší kvalitnější výsledky klasifikace silniční sítě.

9 Zdroje

- AKEL, N. A., ZILBERSTEIN, O. a DOYTSHER, Y. *Automatic DTM extraction from dense raw LIDAR data in urban areas*. 2003. In: Proc. FIG Working Week
- ARCDATA PRAHA: *Geografické informační systémy* [online]. 2013 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.arcdata.cz/uvod/>
- BALTSAVIAS, E. P. 1999. *A comparison between photogrammetry and laser scanning*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing [online]. Volume 54, Issue 2/3, p. 83 – 94. [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.6581&rep=rep1&type=pdf>. ISSN 0924-2716.
- BENZ, U. et al. (2004): *Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 2004, roč. 58, s. 239-258.
- BROMOVÁ, Petra. *Analýza hustoty lesních porostů s využitím texturálních příznaků snímků vysokého prostorového rozlišení a dat leteckého laserového skenování*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2012. 62, viii l. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.
- CLODE, Simon, Peter KOOTSOOKOS a Franz ROTTENSTEINER. *The Automatic Extraction of Roads from LIDAR data*. In: [online]. 2004 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: http://espace.library.uq.edu.au/eserv.php?pid=UQ:9007&dsID=Roads_submitted_.pdf
- ČÁBELKA, M. 2008. *Úvod do GPS*. 2008. (studijní text)
- ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA. *Geologická encyklopedie* [online]. 2007, 19. 1. 2013 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>
- Český úřad zeměměřičský a katastrální: *Státní správa zeměměřictví a katastru* [online]. 2012 [cit. 2012-11-15]. Dostupné z: <http://www.cuzk.cz/>
- DEFINIENS. 2009. *Working with LiDAR .las files*. [online]. Copyright © 2009 Definiens AG. [citováno 2013-01-07]. Dostupné z: <http://www.ecognition.com/news/events/eseminar91124-ecognition-8-working-lidar-las-files>
- DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu*. Brno: Masarykova univerzita, 1998, 208 s. ISBN 80-210-1812-7.
- DOBROVOLNÝ, Petr, Vladimír HERBER a Alois HYNEK. MASARYKOVA UNIVERZITA, Přírodovědecká fakulta, Katedra geografie. *Výuka krajinné ekologie a DPZ* [online]. 2001 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/~dobro/intro.html>

- DOLANSKÝ, T. 2004. *Lidary a letecké laserové skenování* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. [cit. 2013-01-17]. 100 s. Dostupné z: <http://wvc.pf.jcu.cz/ki/data/files/160lidaryweb.pdf>. ISBN 80-7044-575-0.
- DOUCETTE, Peter, Peggy AGOURIS, Anthony STEFANIDIS a Mohamad MUSAVI. *Self-organised clustering for road extraction in classified imagery*. In: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing [online]. 2001 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.23.6206&rep=rep1&type=pdf>
- ENCYCLOPEDIA of Laser Physics and Technology. 2012. [online]. [citováno 2012-11-26]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html
- GEODIS: *Prostor v souvislostech* [online]. 2012 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://geodis.cz/translate/cs/home>
- GISAT [online]. 2013 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz>
- HARALICK R. M., SHANMUGAN K. and DINSTEIN I., *Textural Features for Image Classification*, IEEE Tr. On Systems, Man and Cybernetics, Vol SMC-3, No. 6, November 1973, pp. 610-621
- HATGER, C. a BRENNER, C. *Extraction of Road Geometry Parameters from Laser Scanning and Existing Databases*. 2003. In: <http://www.isprs.org/commission3/wg3/>
- HAZARIKA, M. K., HONDA, K., SAMARAKOON, L., MURAI S., 1999. *Application of remote sensing for extraction of road information*, The 20th Asian Conference on Remote Sensing, 22-25 November, Hong Kong.
- HEDMAN, K., B. WESSEL, U. SOERGEL a U. STILLA. *Automatic road extraction by fusion of multiple SAR views* [online]. 2005 [cit. 2013-01-18]. Dostupné z: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W27/hedman.pdf>
- HINZ, S., A. BAUMGARTNER a C. STEGER. *Road extraction from digital aerial imagery*. In: TUM [online]. Mnichov, 2000 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://ias.informatik.tu-muenchen.de/media/people/steger/publications/2000/lpf-tr-2000-hinz-et-al.pdf>
- HOFMANN, P., 2001. *Detecting buildings and roads from IKONOS data using additional elevation information*, GIS, 6: 28-33.
- HOLLAND, D. A., BOYD, D. S., MARSHALL, P., 2006. *Updating topographic mapping in Great Britain using imagery from high-resolution satellite sensors*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 60, pp. 212-223.
- HOLLAND, David, GUILFORD a Keith MURRAY. DEUTSCHLAND BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE. *Oeepe-Project on topographic mapping from high*

resolution space sensors. 2002. vyd. Frankfurt am Main: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2002. ISBN 3898888657, 9783898888653

HORŇÁKOVÁ, Markéta. *Automatická extrakce budov a zpevněných ploch z dat velmi vysokého rozlišení v suburbánní zóně Prahy*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2011. 99 s. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce RNDr. Lucie Kupková, Ph.D.

HU, Yong. *Automated Extraction of Digital Terrain Models, Roads and Buildings Using Airborne Lidar Data*. Calgary, 2003. Disertační práce. The University of Calgary

JANATOVÁ, Lucie. *Využití snímků DPZ pro pořízení geometrického podkladu mapy pro automobilovou navigaci*. Praha, 2006. 63 s. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

JAROŠ, Jakub. *Detekce linií terénní kostry z dat leteckého laserového skenování*. Praha, 2011. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce RNDr. Jakub Lysák.

JOHN, Jan. *Letecké laserové skenování (ALS/LIDAR) a možnosti jeho využití v archeologii – úvodní informace o projektu*. In: Archeologický ústav Filozofické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích [online]. 2010 [cit. 2013-01-31]. Dostupné z: http://uar.ff.jcu.cz/separaty/John_lidar.pdf

Katalog objektů ZABAGED. Zeměměřičský úřad [online]. 2011, verze 2.3, [cit. 2012-05-06]. Dostupný z: http://www.cuzk.cz/Dokument.aspx?PRARESKOD=998&MENUID=0&AKCE=DOC:30-ZU_ZABAGED

KILIAN, J., HAALA N., ENGLISH M. 1996. *Capture and evaluation of airborne laser scanner data*. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing [online]. Vienna: ISPRS, 2007 [cit.2013-01-17]. Volume 31, Part B3, p. 383 – 388. Dostupné z: http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/383_XXXI-part3.pdf. ISSN 0256-1840.

KOLANKIEWICZOVÁ, Soňa. *Klasifikace liniových prvků z družicových dat*. Praha, 2009. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

KOLÁŘ, Jan, L. HALOUNOVÁ a K. PAVELKA. *Dálkový průzkum Země 10*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 164 s. ISBN 80-010-1567-X.

KRAUS, K., PFEIFER, N. 1998. *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing [online]. Volume 53,

- Issue 2/3, p. 193 – 203. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z URL:
http://www.ipf.tuwien.ac.at/np/Publications/krausPfeifer_ISPRSJ.pdf . ISSN 0924- 2716.
- KUMAGAI, Jun, Huijing ZHAO, Masafumi NAKAGAWA a Ryosuke SHIBASAKI. *Road extraction from high - resolution commercial satellite data*. In: 22nd Asian Conference on Remote Sensing [online]. 2001 [cit. 2013-02-10].
Dostupné z: <http://a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2001/PapersF/280KUMAGAI.pdf>
- KUPKOVÁ, Lucie. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. *Získávání topografické informace (ZTI): Objektově orientovaná klasifikace obrazových dat*. Praha, 2010.
- LEMMENS, M. 2007. *Airborne Lidar Sensors*. *GIM International* [online]. Volume 21, Issue 2, p. 24 - 27. [cit. 2013-01-16]. Dostupné z: http://www.gim-international.com/files/productsurvey_v_pdfdocument_11.pdf. ISSN 1566-9076.
- MALLET, C., BRETAR, F. 2009. *Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art*. [online]. [cit. 2013-01-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- Mapy.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.mapy.cz/>
- MOHAMED, A., PRICE, R., MCNABB, D., GREEN, J., SPENCE, P., 2001. *The development of DORIS: an overview*, Int. Symposium on Mobile Mapping Technology, 3-5 January, Cairo, Egypt, 11 p.
- MORIN, K. W. 2002. *Calibration of Airborne Laser Scanners* [online]. Calgary, 2002. 125 s. Diploma thesis. University of Calgary. [cit. 2013-01-16]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.73.5013&rep=rep1&type=pdf>
- Obec Jirny* [online]. 2001 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.jirny.cz/>
- Obec Modletice* [online]. 2012 [cit. 2013-07-04]. Dostupné z: <http://www.modletice.cz/>
- OPTECH, 2003. *Laser - Based Ranging, Mapping and Detection Systems*, URL: <http://www.optech.on.ca/>.
- PETR, Peter. *Klasifikace dat leteckého laserového skenování s využitím informace o intenzitě a šířce zaznamenaného signálu*. Praha, 2012. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.
- PFEIFER, N.; BRIESE, CH. 2007. *Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning*. In: *Proceedings of the ISPRS Workshop - Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007* [online]. Espoo : ISPRS, 2007 [cit. 2013-01-17]. Volume 36, Part 3, p. 311 – 319. Dostupné z: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/final_papers/Pfeifer_2007_keynote.pdf. ISSN 1682-1777.

RIEGER, W., KERSCHNER, M., REITER, T. a ROTTENSTEINER, F. *Roads and buildings from laser scanner data within a forest enterprise*. 1999. In: Sborník z workshopu ISPRS na LaJolla, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, svazek XXXII, část 3/W14, LaJolla, Kalifornie, USA, str. 185 - 191.

ROTTENSTEINER, F., TRINDER, J., CLODE, S. a KUBIC, K., 2003. *Building detection using LIDAR data and multispectral images*. In: Proceedings of DICTA, Sydney, Australia, str. 673–682.

Ředitelství silnic a dálnic České republiky [online]. 2013 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.rsd.cz/>

SCHIEWE, J., L. TUFTE a M. EHLERS. *Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing*. GIS - Geo-Informationssysteme 6 [online]. 2001 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://www.ecognition.com/sites/default/files/400_gis200106034.pdf

SONG, J. H., HAN, S. H., YU, K., KIM, Y., 2002. *Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data*, IAPRS, 9-13 September, Graz, vol. 34, 4 p

SYED, S.; DARE, P.; JONES, S. 2005. *Automatic classification of land cover features with high resolution imagery and lidar data: an object oriented approach* [online]. Proceeding of SSC2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis, Spatial Science Institute [cit. 2013-03-21]. ISBN 0-9581366-2-9, Dostupné z URL: < http://www.ecognition.com/sites/default/files/266_0185.pdf>

TAO, G., YASUOKA, Y., 2002. *Combining high resolution satellite imagery and airborne laser scanning data for generating bareland dem in urban areas*. In: IAPRS, Vol.34 (Part 5/W3): 6 pages

TRIMBLE. *eCognition Developer 8.8: User Guide*. Německo, 2012

VOSSelman, G. *On the Estimation of Planimetric Offsets in Laser Altimetry Data*. 2002. In: IAPRSIS, svazek. XXXIV/3A, str. 375–380.

VOSSelman, G. 2000. *Slope based filtering of laser altimetry data*. In: International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing [online]. Amsterdam: ISPRS, 2000 [cit. 2013-03-22]. Volume 33, Part B3, p. 935 – 942. Dostupné z URL: http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_RS/Optical_and_Laser_Remote_Sensing/Research/Research_Fields/Digital_Terrain_Model/doc/vosselmanfiltering.pdf. ISSN 1682-1750.

VÚGTK. c2005-2013. *Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí* [online]. VÚGTK c2005-2013. [cit. 2013-01-8]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovník>

VÚV TGM - Oddělení GIS - *Princip leteckého laserového skenování*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka [online]. 2011 [cit. 2012-12-05]. Dostupné z:

<http://www.dibavod.cz/90/princip-leteckeho-laseroveho-skenovani.html?PHPSESSID=b32f83c256d387bb29c>

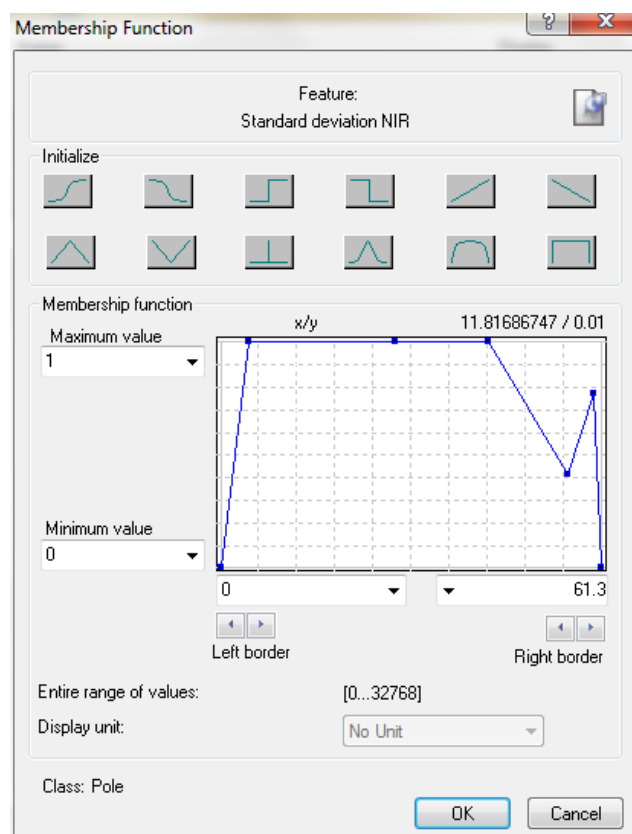
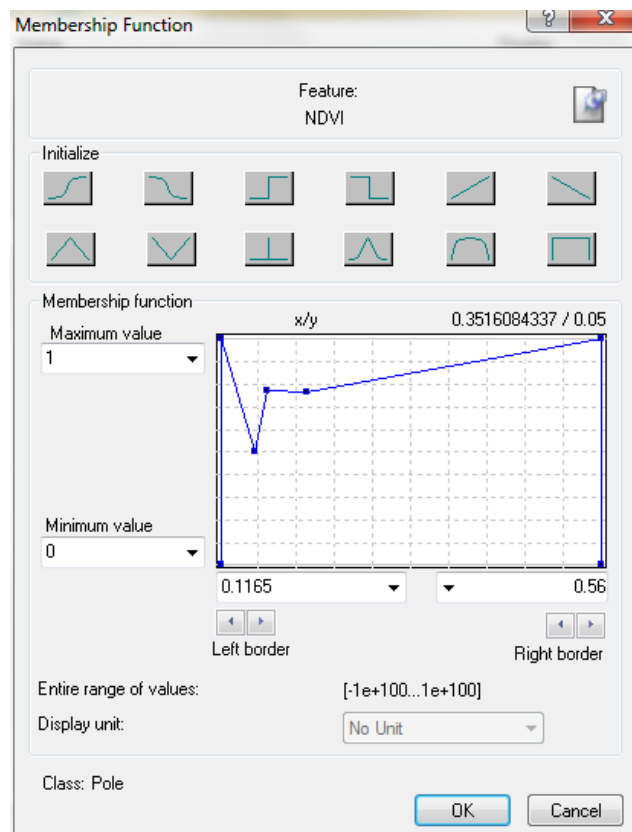
WALTER, V. (2004): Object-based classification of remote sensing data for change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 2004, č. 58, s. 225-238.

WEHR, A; LOHR, U. 1999. *Airborne laser scanning – an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing [online]. Amsterdam: Elsevier Science, 1999 [cit. 2013-01-17]. Volume 54, Issue 2/3, p. 68 – 82. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.516&rep=rep1&type=pdf>. ISSN 0924-2716.

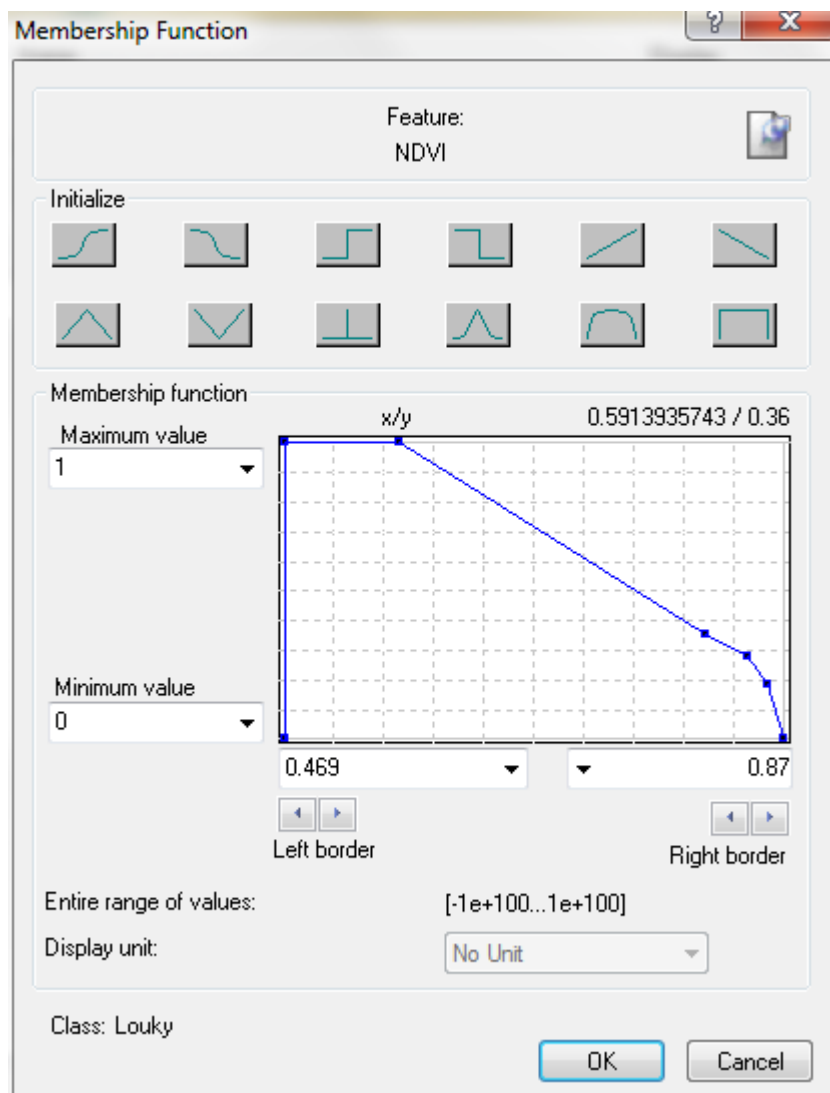
Seznam příloh

PŘÍLOHA 1:	PŘEHLED FUNKCÍ PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU POLE - JIRNY.....	74
PŘÍLOHA 2:	FUNKCE PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU LOUKY – JIRNY	75
PŘÍLOHA 3:	FUNKCE PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU VODNÍ PLOCHY - JIRNY.....	76
PŘÍLOHA 4:	FUNKCE PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU LESY - JIRNY.....	77
PŘÍLOHA 5:	PŘEHLED FUNKCÍ PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU SILNIC - JIRNY.....	78
PŘÍLOHA 6:	KLASIFIKAČNÍ POSTUP - JIRNY	79
PŘÍLOHA 7:	VÝLEDNÁ KLASIFIKACE NAD OBCÍ JIRNY	80
PŘÍLOHA 8:	SILNIČNÍ SÍŤ V OKOLÍ OBCE JIRNY	81
PŘÍLOHA 9:	POROVNÁNÍ VÝLEDKŮ S VRSTVOU ZABAGED – LOKALITA JIRNY	82
PŘÍLOHA 10:	PŘEHLED FUNKCÍ PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU POLE - MODLETICE.....	83
PŘÍLOHA 11:	FUNKCE PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU LOUKY - MODLETICE	84
PŘÍLOHA 12:	FUNKCE PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU VODNÍ PLOCHY - MODLETICE	85
PŘÍLOHA 13:	PŘEHLED FUNKCÍ PŘÍSLUŠNOSTI PRO TŘÍDU SILNIC - MODLETICE	86
PŘÍLOHA 14:	KLASIFIKAČNÍ POSTUP - MODLETICE	87
PŘÍLOHA 15:	VÝLEDNÁ KLASIFIKACE NAD OBCÍ MODLETICE.....	88
PŘÍLOHA 16:	SILNIČNÍ SÍŤ V OKOLÍ OBCE MODLETICE	89
PŘÍLOHA 17:	POROVNÁNÍ VÝLEDKŮ S VRSTVOU ZABAGED – LOKALITA MODLETICE.....	90

PŘÍLOHA 1: Přehled funkcí příslušnosti pro třídu pole - Jirny



PŘÍLOHA 2: Funkce příslušnosti pro třídu louky – Jirny



PŘÍLOHA 3: Funkce příslušnosti pro třídu vodní plochy - Jirny

Membership Function

Feature:
Mean NIR

Initialize

Membership function

Maximum value
1

Minimum value
0

x/y 166.5746988 / 0.56

161 227.1

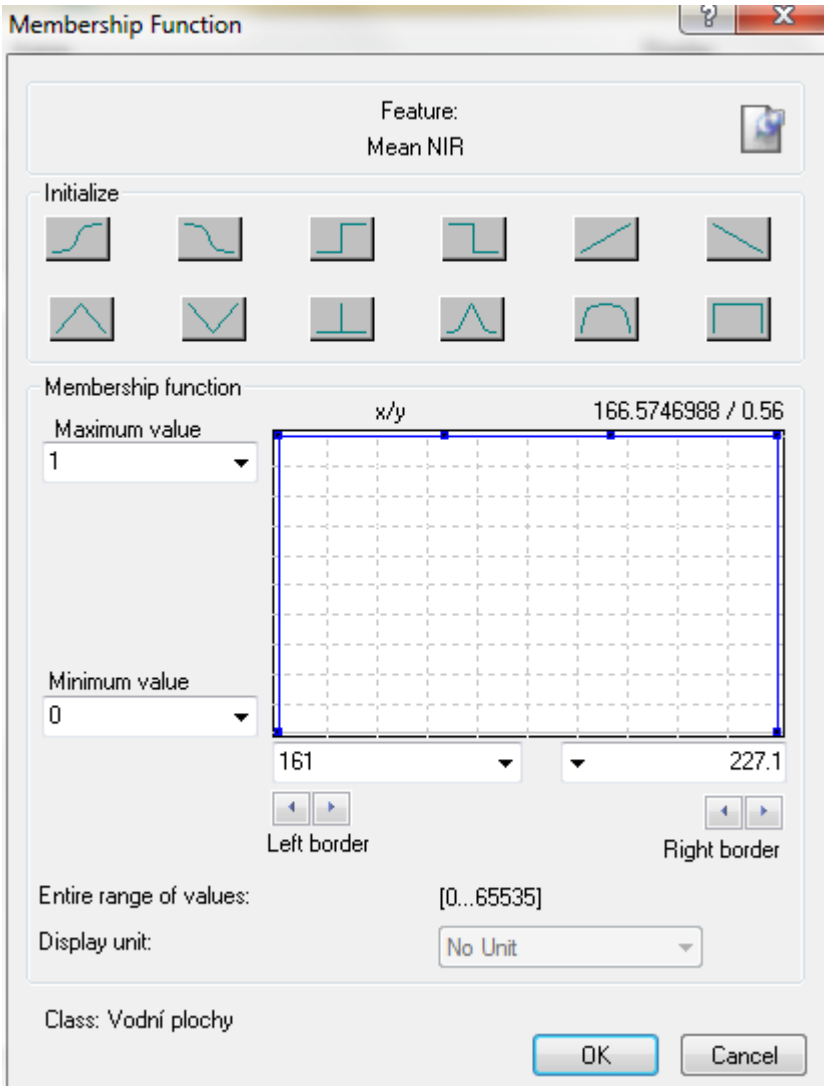
Left border Right border

Entire range of values: [0...65535]

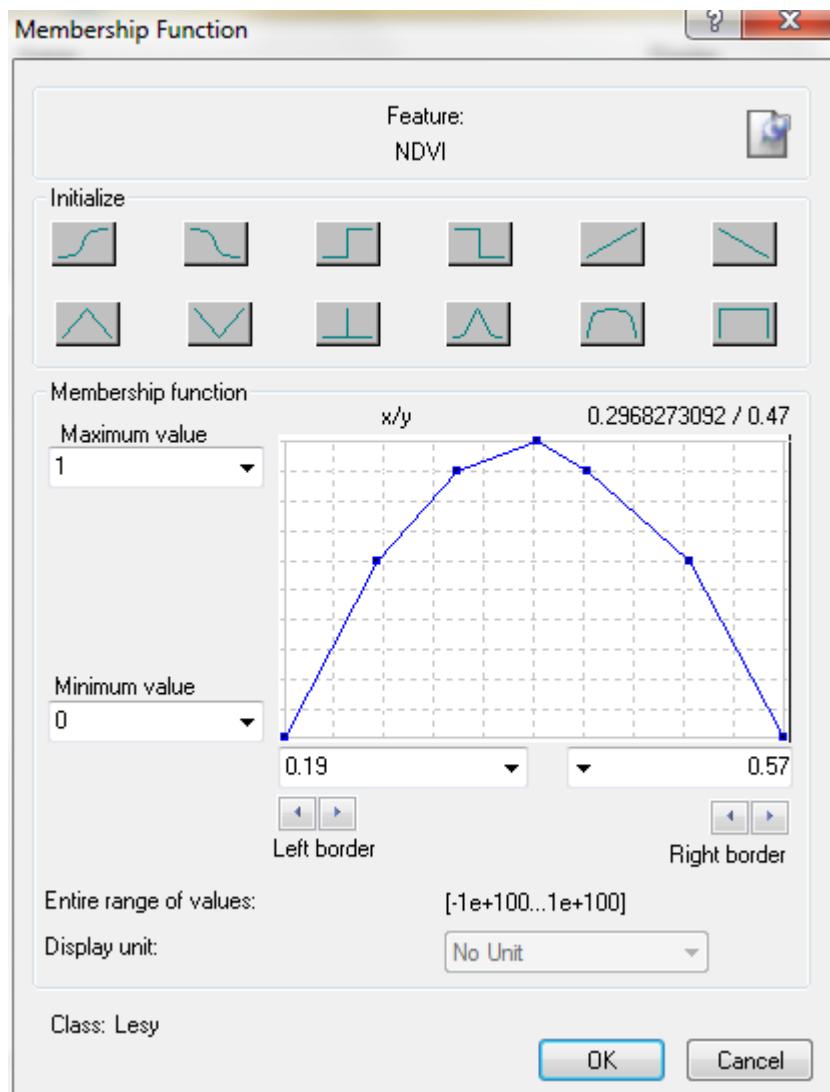
Display unit: No Unit

Class: Vodní plochy

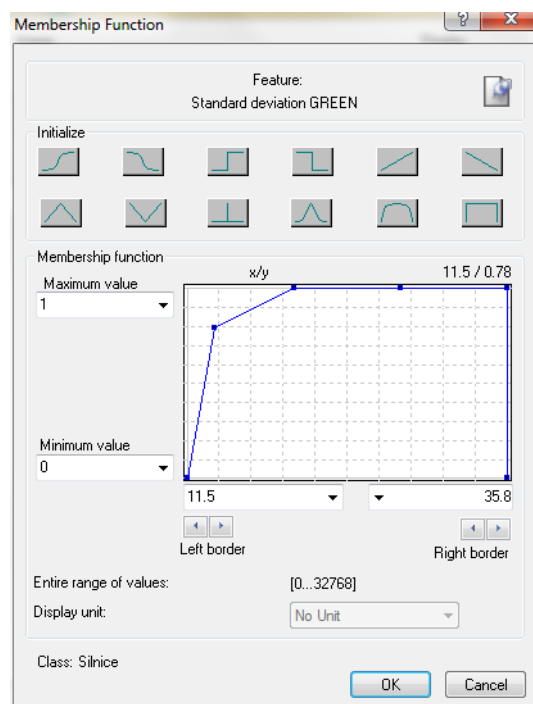
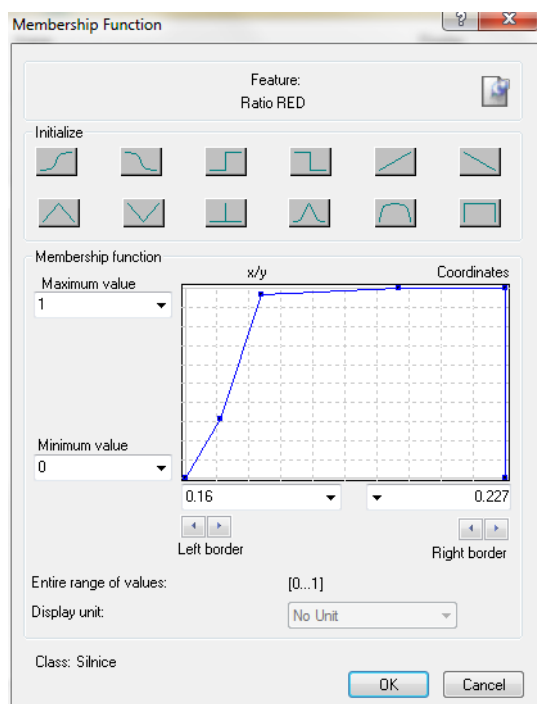
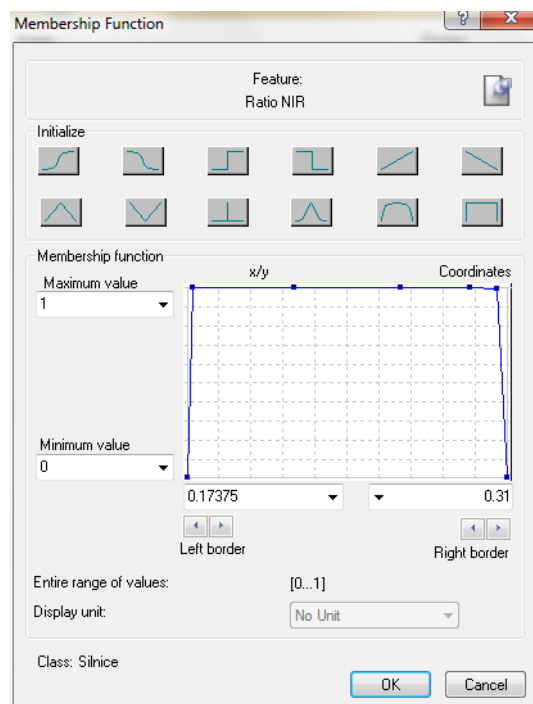
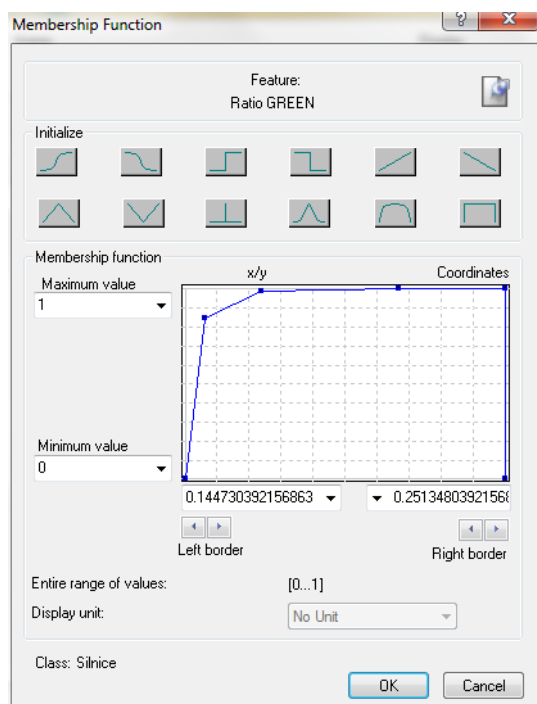
OK Cancel



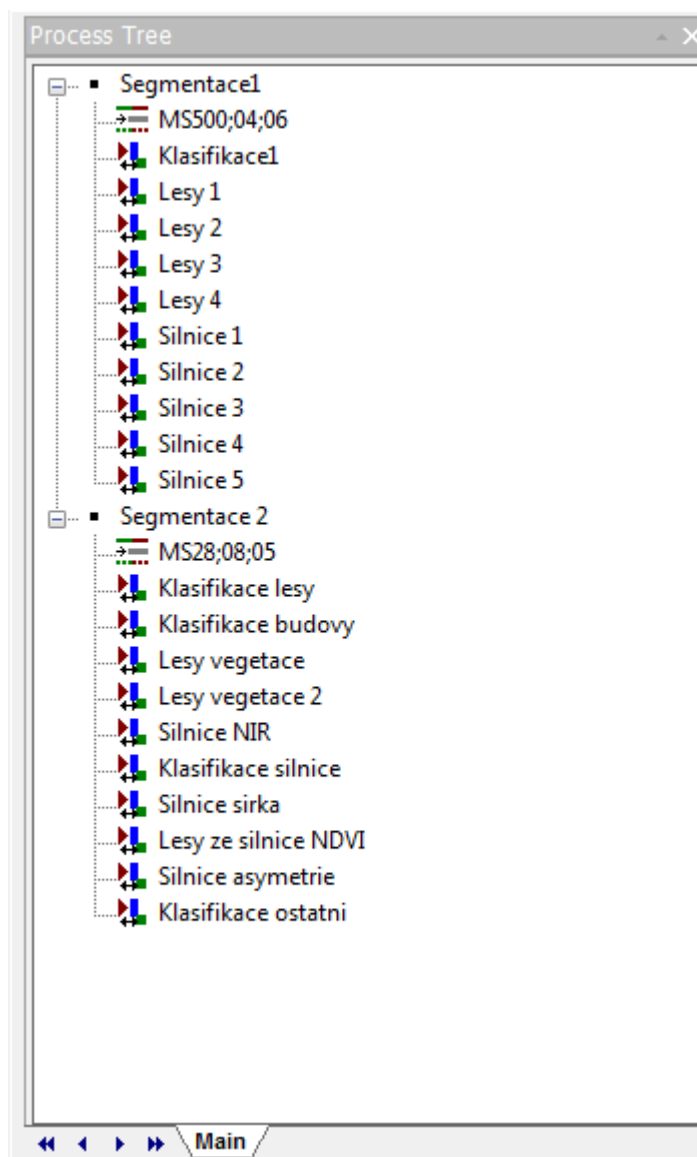
PŘÍLOHA 4: Funkce příslušnosti pro třídu lesy - Jirny



PŘÍLOHA 5: Přehled funkcí příslušnosti pro třídu silnic - Jirny



PŘÍLOHA 6: Klasifikační postup - Jirny



PŘÍLOHA 7: Výsledná klasifikace nad obcí Jirny



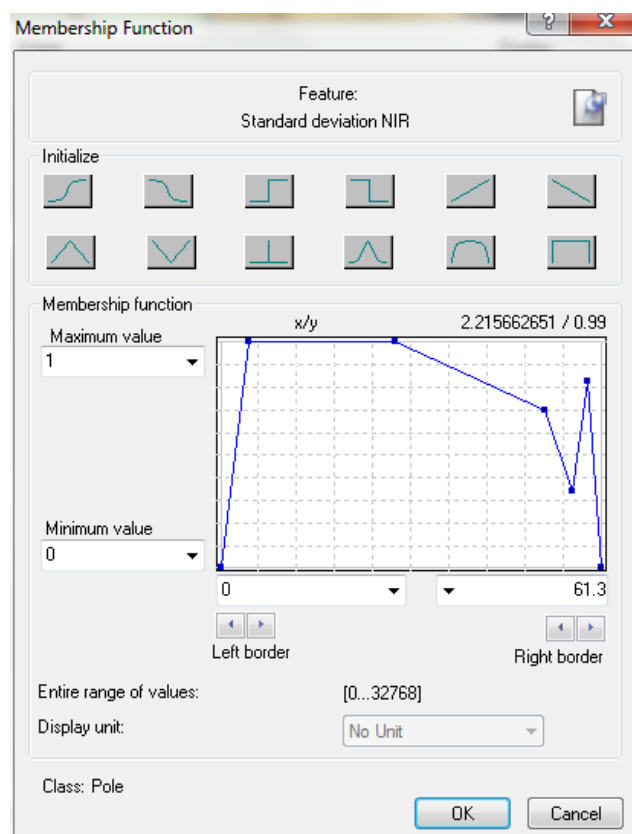
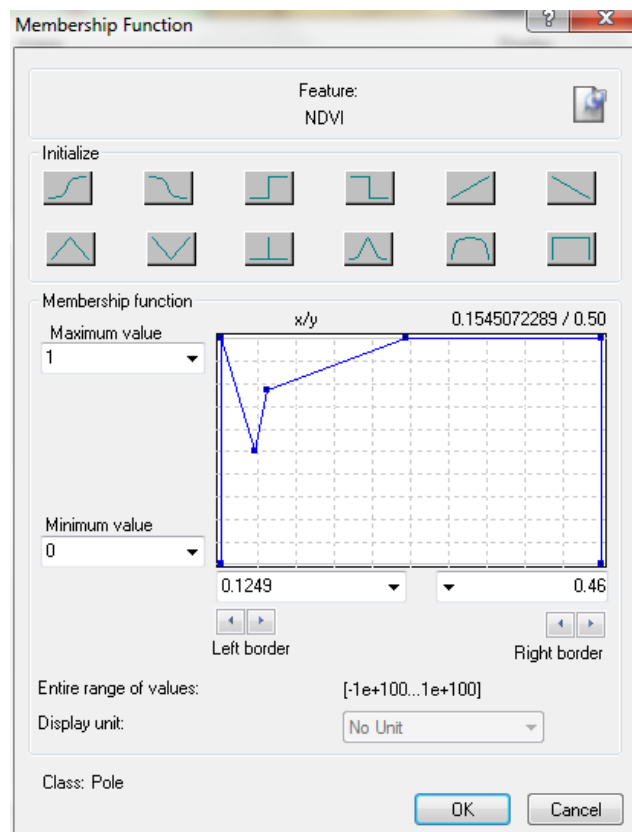
PŘÍLOHA 8: Silniční síť v okolí obce Jirny



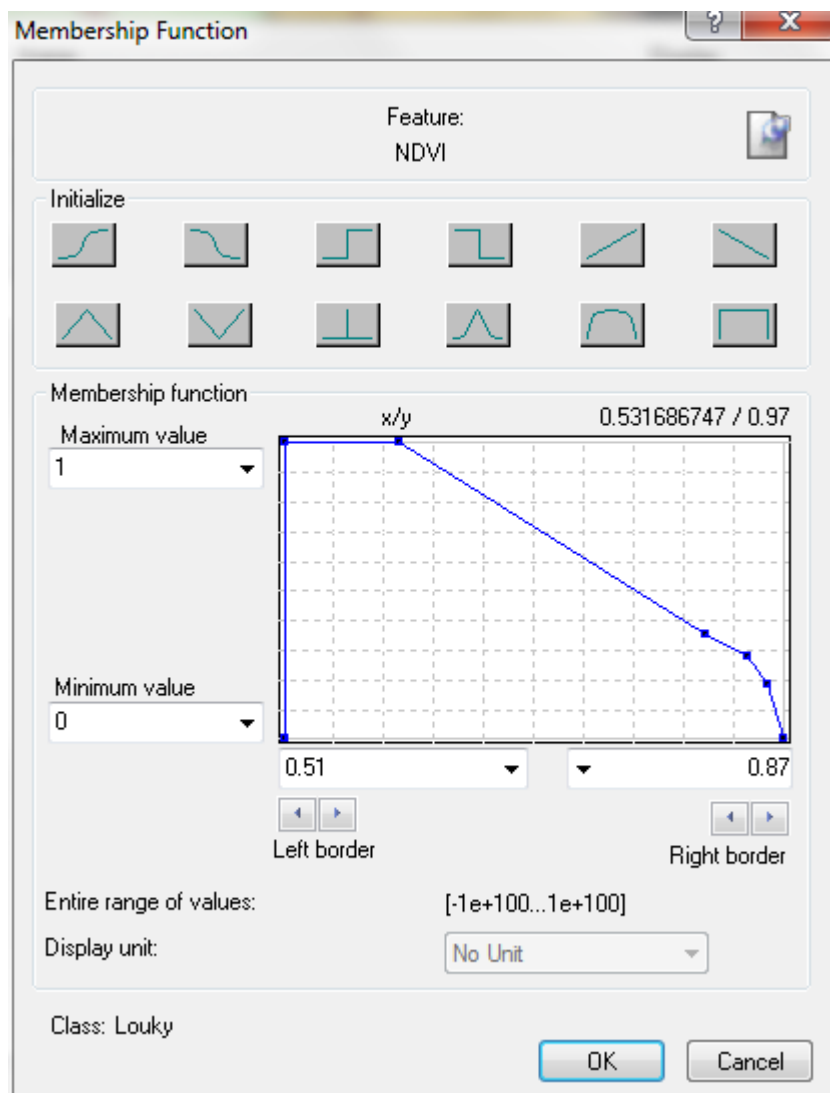
PŘÍLOHA 9: Porovnání výsledků s vrstvou ZABAGED – lokalita Jirny



PŘÍLOHA 10: Přehled funkcí příslušnosti pro třídu pole - Modletice



PŘÍLOHA 11: Funkce příslušnosti pro třídu louky - Modletice



PŘÍLOHA 12: Funkce příslušnosti pro třídu vodní plochy - Modletice

Membership Function

Feature:
Mean NIR

Initialize

Membership function

Maximum value
1

Minimum value
0

x/y 102.2048193 / 0.05

80 177

Left border Right border

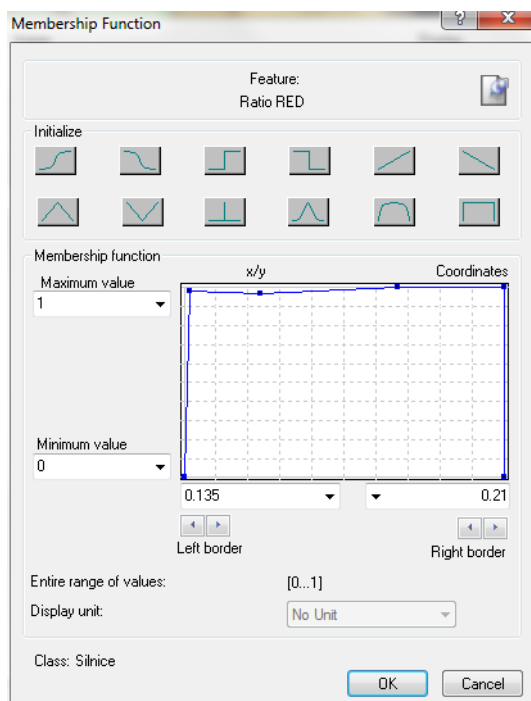
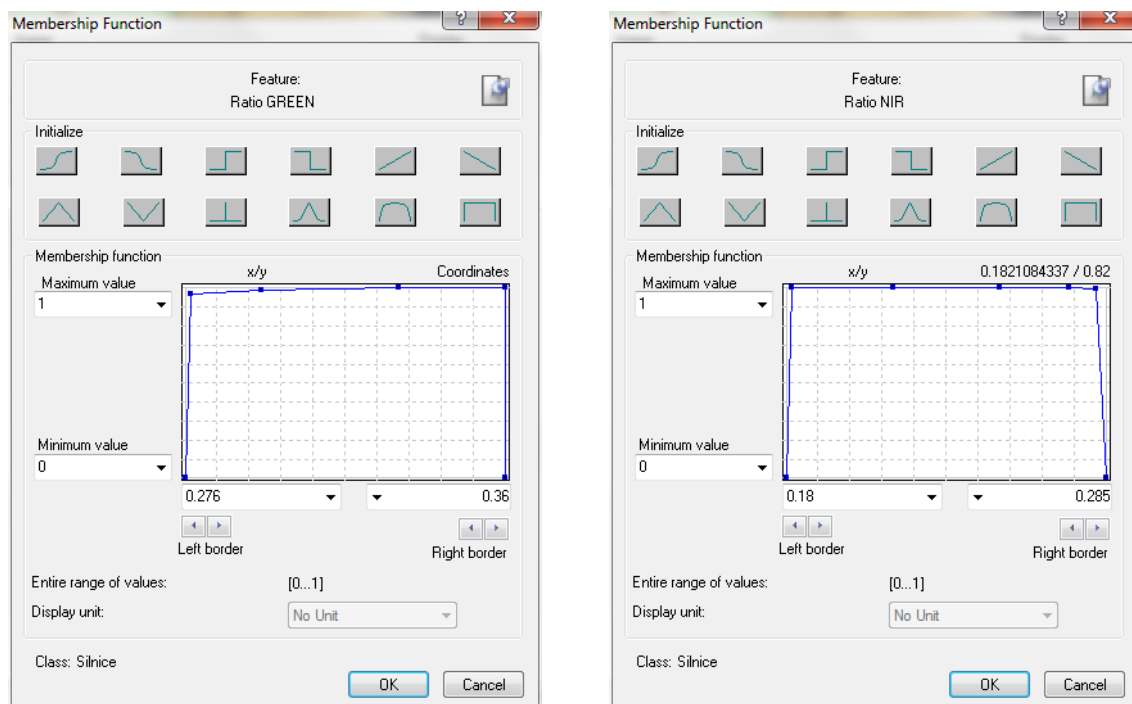
Entire range of values: [0...65535]

Display unit: No Unit

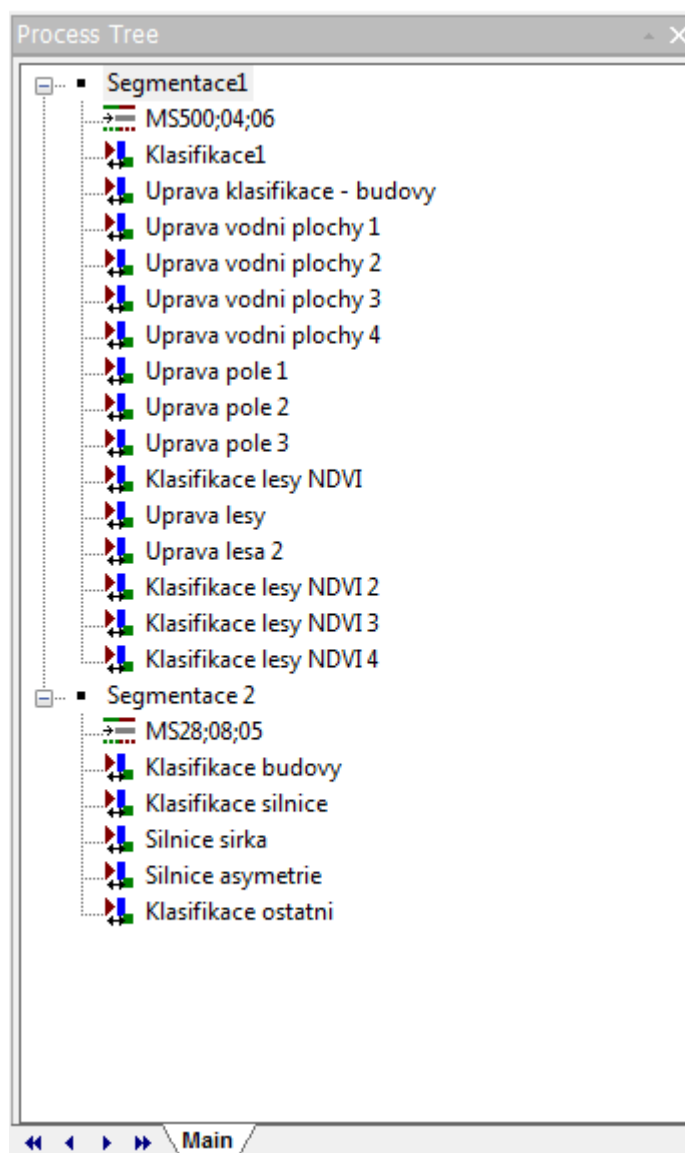
Class: Vodní plochy

OK Cancel

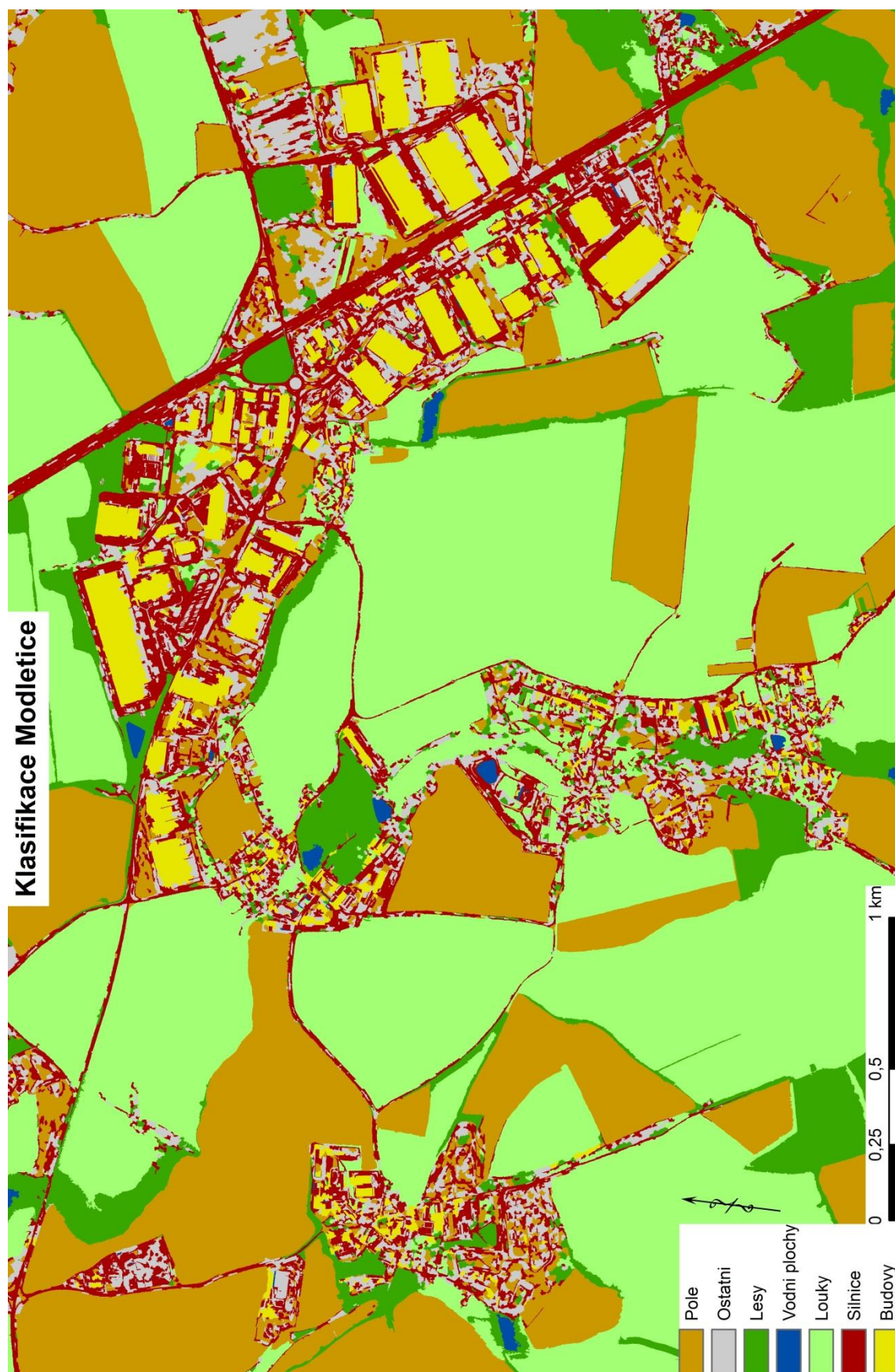
PŘÍLOHA 13: Přehled funkcí příslušnosti pro třídu silnic - Modletice



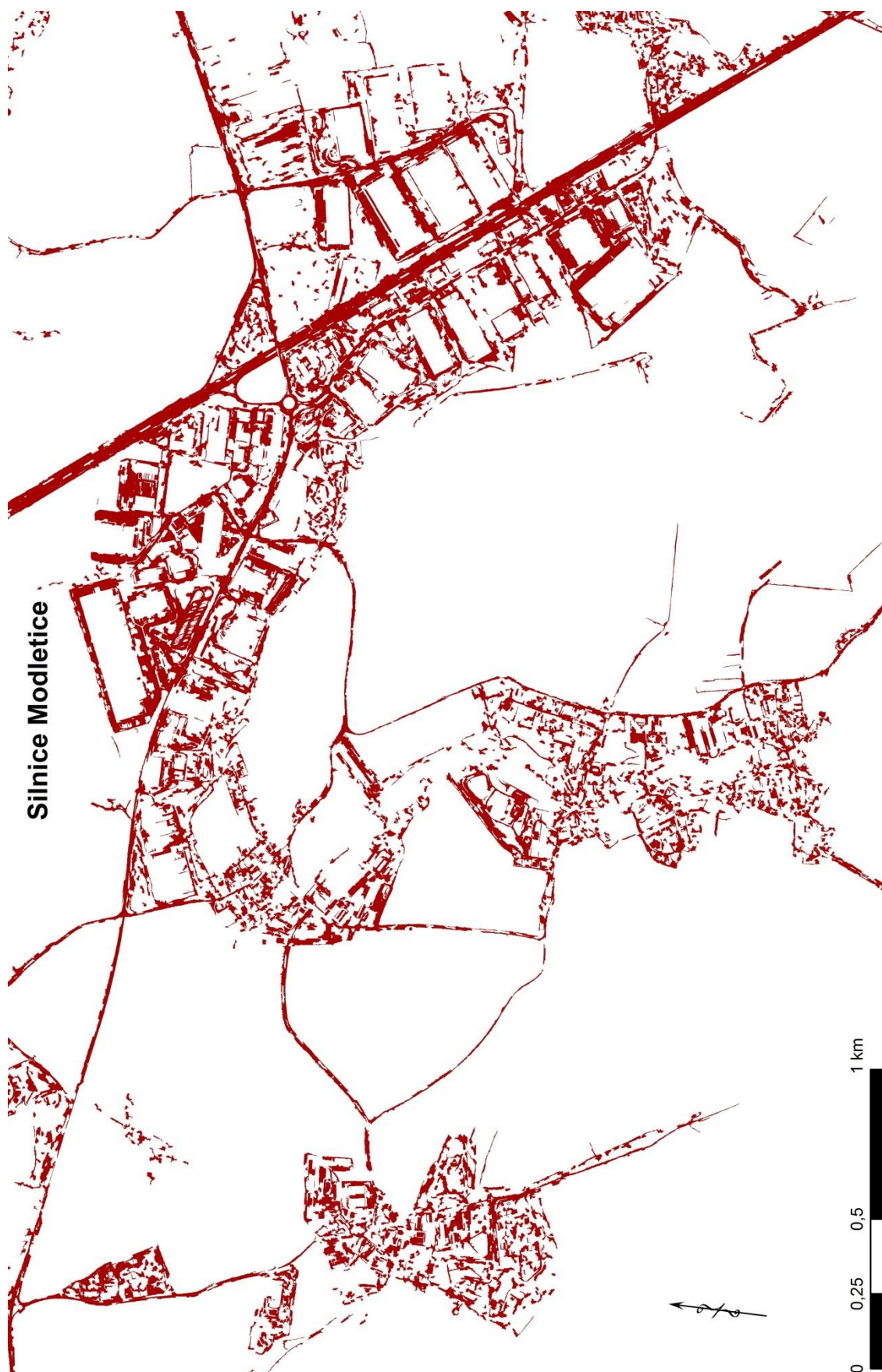
PŘÍLOHA 14: Klasifikační postup - Modletice



PŘÍLOHA 15: Výsledná klasifikace nad obcí Modletice



PŘÍLOHA 16: Silniční síť v okolí obce Modletice



PŘÍLOHA 17: Porovnání výsledků s vrstvou ZABAGED – lokalita Modletice

